

任意滑动面搜索新方法应用于三维复杂土坡稳定性分析

李亮, 邓东平*, 赵炼恒

(中南大学土木建筑学院, 湖南长沙 410075)

摘要: 在提出任意三维滑动面搜索方法的基础上, 针对滑动体非对称情况(包括准线不对称和长度不对称)、母线不在滑动体内沿滑动方向断面尺寸最大的面上、土坡含软弱夹层的情况, 采取了一些解决措施, 并将其应用于工程上常见的填挖方复合土坡、水平分层填方路堤、公路纵断面为平斜坡的土坡和含软弱夹层的土坡这4种算例中。分析表明: ①此方法可以对一些较复杂条件下的土坡进行稳定性分析, 并能够寻找到较优的最危险滑动面(包括整体和局部稳定性); ②当填挖边坡上填方段和挖方段的材料不一致时, 更容易在抗滑稳定性差的材料处发生失稳, 但当填方段和挖方段的材料重度 γ 相同时, 两种材料的 φ/c 是否相等在一定程度上对滑动体的对称性和大小有影响; ③对于公路纵断面为平斜坡的土坡, 其潜在最危险滑动面更倾向于平坡段, 斜坡对边坡的稳定系数有一定的积极影响; ④在含软弱夹层的土坡中, 当滑动体的长度无限长时, 其三维稳定性趋于二维稳定性, 与以往研究成果相比较时, 得出本文方法计算出的结果与之非常接近, 说明本文方法可行。

关键词: 三维土坡; 稳定性分析; 母线; 准线; 准线非对称; 长度非对称; 软弱夹层

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)04-0544-10

作者简介: 李亮(1962-), 男, 江苏泰兴人, 中南大学教授, 博士生导师, 主要从事道路与铁道工程等方面研究。

E-mail: dengdp851112@126.com。

Application of new method of arbitrary sliding surface search to stability analysis of complex three-dimensional slopes

LI Liang, DENG Dong-ping, ZHAO Lian-heng

(College of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the proposed arbitrary three-dimensional sliding surface search, for the sliding body of asymmetry (including the case of asymmetry of standard line and asymmetry of length), mother line being not in the largest cross-section of the sliding body along the sliding direction and slopes with weak interlayer, some solution measures are used. Then they are applied to four examples in the engineering: common excavation and filling compound slope, filling embankment at form of hierarchical level, vertical section of road with flat and oblique slope and the slope with weak interlayer. Analysis shows that: firstly, this method can be employed to analyze stability of some slopes under complex conditions and to find the optimization of the most dangerous sliding surface (including the general and partial stability); secondly, when the fill and excavation materials are inconsistent in excavation and filling compound slope, the sliding instability occurs more easily at poor stability of materials, but in the case of filling and excavation materials with the same severe γ , whether or not φ/c of the two materials is equal impacts symmetry and size of the sliding body on a certain extent; thirdly, for the slope of vertical section of road with flat slope, the most dangerous sliding surface is more inclined to flat slope section of the slope, and oblique slope section of the slope has some positive impact on the slope stability; fourthly, in the slope with weak interlayer, when the length of sliding body reaches infinite length, its three-dimensional stability tends to two-dimensional stability, and the results from this method are very close when compared with the previous results of other methods, so it shows that this method is feasible.

Key words: three-dimensional slope; stability analysis; mother line; standard line; asymmetry of standard line; asymmetry of length; weak interlayer

0 引言

三维极限平衡法是在二维极限平衡领域的某一方法的基础上发展起来的^[1-10]。对于安全系数的计算,

基金项目: 西部交通建设科技项目(2006318802111); 铁道部科技研究开发计划重点项目(2008G032-3); 湖南省交通厅科技项目(2007-29)

收稿日期: 2009-12-24

*通讯作者

已有研究常以将滑动体离散成微小铅垂条分块为基础^[1-3,8-12], 或不考虑条间力、或部分考虑条间力或完全考虑条间力, 提出了各种计算公式。但在三维边坡稳定性分析中^[1-2,4,13-16], 前人一般是基于已知滑动面或假定滑动面为规则形状, 如对数螺旋面, 椭球面等^[17], 因而限制了极限平衡方法在三维边坡中的应用。

本文在已有成果的基础上, 提出了一种不依赖滑动面形状的滑动面搜索新方法。同时, 为了使本文方法能够应用于各种复杂条件, 提出了一些处理措施, 并结合工程实际问题, 例如挖填方组成的复合边坡, 含软弱夹层的土坡, 公路纵断面上平陡斜坡引起三维边坡形状不对称问题和水平分层填方路堤可能存在的局部稳定性问题, 对其进行了探讨性研究。

1 三维滑动面搜索方法主要思想

1.1 三维滑动面的随机产生

产生三维滑动面的过程为: ①随机生成一条母线 a (母线 a 与坡面线组成的面为滑动体内沿滑动方向上断面尺寸最大的面, 即二维平面滑动面, 陈祖煜^[17]称为中性面), 如图 1, 2 所示; ②随机生成一条准线 b (准线 b 与坡面线组成的面为滑动体滑动体内垂直滑动方向上断面尺寸最大的面, 即过母线上 P_0 点在 yz 平面内的一条曲线, 并且准线 b 与坡面之间的最大竖直距离 h_{max} 等于母线 a 与坡面之间的最大竖直距离 h_{max}), 如图 2 所示; ③准线 b 在母线 a 上移动, 并在移动时, 准线 b 超出坡面的部分被截除 (或者母线 a 在准线 b 上移动, 并在移动时, 母线 a 超出坡面的部分被截除), 如图 3 所示。这样形成的三维滑动面即为本文所述的随机三维滑动面。同时, 在滑动面形成过程中, 母线和母线的平移线与准线和准线的平移线将这样形成的滑动体划分为 $n \times m$ 个微小铅垂条块, 如图 1 所示 (注明: P_0, P_1 分别为母线 a 与坡面之间的最大竖直距离处在母线和坡面上的点)。

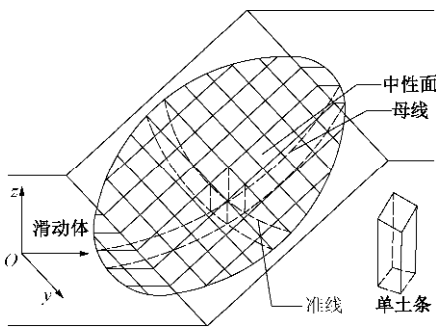


图 1 具有垂直界面条柱的滑动土体
Fig. 1 Sliding soil with vertical interface

1.2 母线的随机产生

如图 4 所示, A, B 为假想滑动面与边坡上、下缘

(或坡面上)的交点, 假设一个过 A 点的初始方向 AC , 终止方向为 AB , a_1 为初始角, a_2 为终止角 (a_1, a_2 分别为初始方向 AC , 终止方向 AB 与边坡下缘水平延长线之间的夹角, a_1 在边坡下缘线延长线以下为正, a_2 与之相反)。其中 A, B 点的位置是任意的, 在实际操作中, 是选取 A, B 点的一定范围, 按一定步长进行搜索。

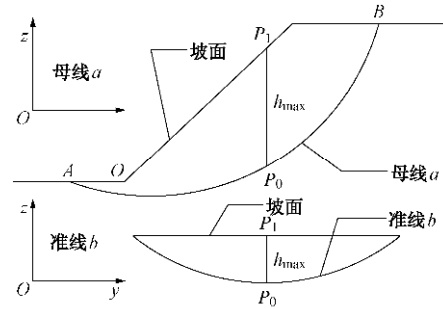


图 2 母线和准线

Fig. 2 Mother line and standard line

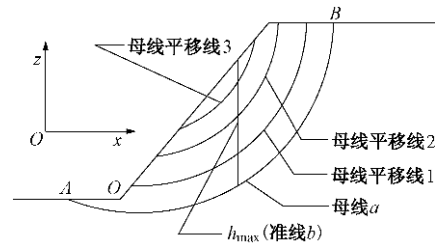


图 3 随机滑动面在 xz 轴上的投影

Fig. 3 Projection of random sliding surface in xz axis

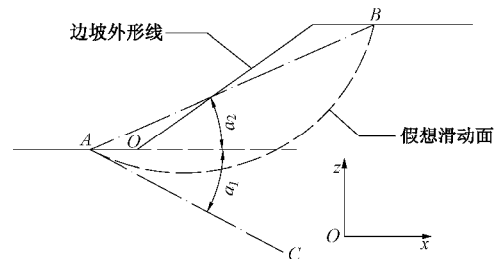


图 4 基本思路

Fig. 4 Basic idea

基本随机过程: 如图 5 所示, 从一个假定的初始方向 ($-a_2 \leq a_1 \leq 45^\circ$ ^[17], 注: 此式符合一般情况, 但可适当放宽到 $a_1 \leq 90^\circ$) AC 逆时针旋转到终止方向 AB 随机产生 n 个角 (或角方向); 将 AB 之间的土体也划分为 n 个土条 (当角度随机时, 土条等不等分影响不大, 故而在此采用简单的等分土条), 设第 i 个土条与边坡下缘线的水平延长线的交点按顺序为 X_{i-1}, X_i ; 第 i 个随机角 (或随机方向) 与点 X_i 的竖直线的交点为 i , 依次连接这些交点即可形成一条随机曲线。

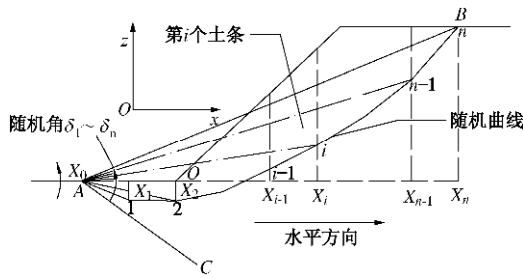


图5 母线随机模型

Fig. 5 Stochastic model of mother line

1.3 准线的随机产生

如图6(a)所示, h_{max} 为母线与坡面之间的最大竖直距离, l 为滑动体的纵向(即长度方向)滑动范围, $b = \arctan(h_{max}/l)$ 。基本搜索过程: 以母线 h_{max} 处点的水平切线方向逆时针旋转 β 角时, 随机产生 m 个角(或角方向)。同时, 将 l 长的土体也划分为 m 个土条(当角度随机时, 土条不等分影响不大, 故而在采用简单的等分土条), 设第 j 个土条与边坡下缘线的水平延长线的交点按顺序为 Y_{j-1} 、 Y_j ; 第 j 个随机角(或随机方向)与点 Y_j 的竖直线的交点为 j , 依次连接这些交点即可形成一条随机曲线。

对于准线为对称的情况, 只需要一边生成这样的随机曲线, 如图6(b)所示; 对于准线为非对称的情况, 则需要两边同时随机生成这样的曲线, 如图6(c)所示。

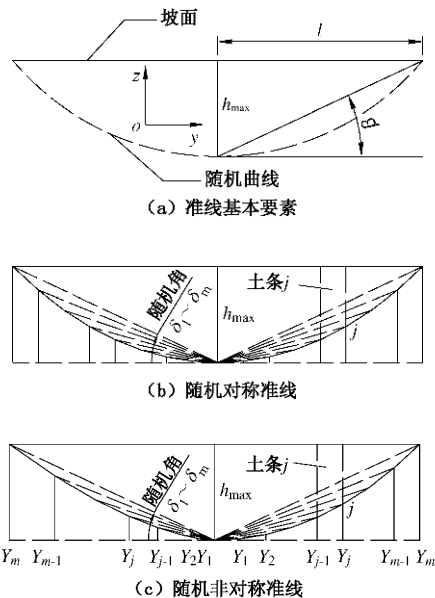


图6 准线构造模型

Fig. 6 Structural model of standard line

1.4 随机角的产生与优化

如图7所示, 随机角的产生: 本文方法规定第 i (j) 个随机角是前 $i-1$ ($j-1$) 个随机角的基础上产生。

对于母线:

$$d_i = \text{Rnd}() \times (a_1 + a_2 - \sum_j^{i-1} d_j) \quad (i \geq 1) \quad (1)$$

对于准线:

$$d_j = \text{Rnd}() \times (b - \sum_k^{j-1} d_k) \quad (k \geq 1) \quad (2)$$

式中, $\text{Rnd}()$ 表示 0~1 之间的随机数。

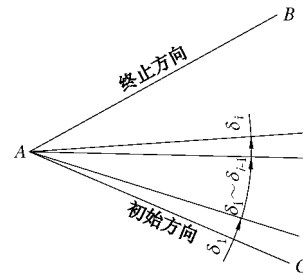


图7 随机角

Fig. 7 Random angle

在均质土坡稳定性分析中, 在不进行人为限定的情况下, 其滑动面一般为光滑滑动面, 因此本文方法中形成滑动面的母线和准线必须是光滑曲线。而如何保证这样随机产生的母线和准线是光滑曲线, 需要对随机角进行优化。

如图7所示, 优化过程如下:

(1) 第1个随机角为

对于母线:

$$d_1 = \text{Rnd}() \times (a_1 + a_2) / n \quad (3)$$

对于准线:

$$d_1 = \text{Rnd}() \times b / m \quad (4)$$

(2) 第 i (或 j) 个随机角为

对于母线:

$$d_i = \text{Rnd}() \times \left[(a_1 + a_2) - \sum_j^{i-1} d_j \right] / (n+1-i) \quad (5)$$

对于准线:

$$d_j = \text{Rnd}() \times (b - \sum_k^{j-1} d_k) / (m+1-j) \quad (6)$$

(3) 第 n (或 m) 个随机角为

对于母线:

$$d_n = (a_1 + a_2) - \sum_j^{n-1} d_j \quad (7)$$

对于准线:

$$d_m = b - \sum_k^{m-1} d_k \quad (8)$$

1.5 以近似曲线代替随机曲线

用这样形成的两条随机曲线来搜索最危险滑动面, 通常需要几千、几万次的随机搜索, 才能达到足

够的精度^[17-18], 这样势必会对计算速度产生影响, 而且计算出的结果也需要加以判断才能确定其是否为真值。因而需要一种变动的近似曲线能像随机曲线一样模拟任何曲线, 并能够近似地模拟任何滑动面, 但它搜索滑动面的过程又不是随机过程, 因此本文提出了如下解决方法。

如图 8 所示, 可知对于一条随机母线而言: ① 初始方向可决定曲线的下凹程度; ② 土条和角度划分情况可以模拟曲线的形态变化。当角度方向相同时 (这里取 Ad'_i), 曲线 1, 2 在过 A 点的水平延长线上的交点分别为 X_i, X'_i , 即说明土条划分情况不同; 当取土条划分情况相同时 (这里取 $X_i d'_i$), 过 A 点到土条划分线与曲线 1, 2 的交点连线方向 (Ad_i 和 Ad'_i) 不同, 即说明角度划分情况不同。

根据上述, 将角度随机转化为一定条件下的土条和角度划分来实现近似曲线代替随机曲线。对于随机准线来说, 相比随机母线只是没有了初始方向, 增加了变动长度 l , 因而也可以采用母线这种近似曲线的做法。同时, 这种做法并没有对滑动面的模拟范围减小, 但它对随机搜索精度不高进行了改进, 而且也不以牺牲计算速度为代价。

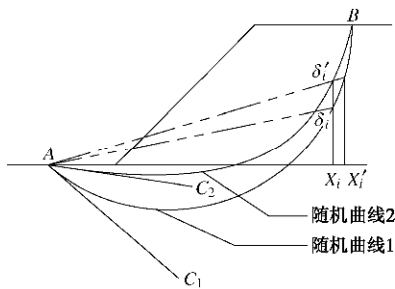


图 8 曲线形状要素

Fig. 8 Factors of curve shape

1.6 近似曲线简化

近似曲线的构造方式有很多种, 为了便于编程计算, 本方法对近似曲线的形成进行了简化。

母线形成简化过程如下:

(1) 初始角度为 δ , 增量为 q , 则第 i 个旋转角为 $d + (i-1) \cdot q$; 初始土条宽度为 x , 增量为 a , 则第 i 个土条宽度为 $x + (i-1) \cdot a$ 。

(2) 取 $d = q$, 设 A, B 两点连线的水平投影为 l_{AB} , 把初始土条宽度 x ($x = l_{AB} / n + \Delta x$, 其中 Δx 为可变微量) 作为未知数, 则 $a = 2(nx - l) / [n(n-1)]$ 。当 Δx 变化时, 构造的近似曲线也会随着变化。(注明: n 为母线划分的土条数)。

对于准线形成的简化如母线一样, 只需将母线中的初始土条宽度改为 y ($y = l / m + \Delta y$, 其中 Δy 为可变微量, l 为滑动体的长度)。(注明: m 为准线划分的

土条数)

尽管本方法对近似曲线的形成进行了简化, 但当土条分数一定大时, 它并不会削弱对任何曲线的模拟, 只不过是曲线的逼真度稍有影响, 因而以母线和准线为基础生成的三维曲面能够在一定程度上表示任何曲面。

1.7 安全系数 K 的计算方法

本文借鉴文献[8]给出的一种简单而实用的三维安全系数的计算方法, 同时结合了二维的简化 Janbu 法。在这种方法中, 滑动体被离散成铅垂条块, 这与本文利用母线随准线移动形成滑动体的微小单元条块一致。其中, 该法忽略了条块 4 个侧面的上沿铅垂方向 (z 方向) 的剪力。

如图 9 所示, 利用铅垂方向 (z 方向) 的力的平衡条件, 以及 ox' 方向 (滑体滑动方向, 即本文所说的母线方向) 力的平衡条件, 在整个滑体范围内, 确定安全系数 K 为

$$K = \frac{\sum [c_{ij} A_{ij} \cos g_{zij} + W_{ij} \tan j_{ij}] / m_{qij}}{\sum W_{ij} \sin a_{xij}} \quad (9)$$

$$m_{qij} = \cos g_{zij} + \frac{\tan j_{ij}}{K} \sin a_{xij} \quad (10)$$

式中 c_{ij}, j_{ij}, A_{ij} 为条块 (i, j) 滑面上的黏聚力、摩擦系数、条块的底面积; W_{ij} 为条块的重量; g_{zij} 为滑面 ij 的法向与 oz 轴的夹角; a_{xij} 为 ox 轴与 ox' 的夹角。

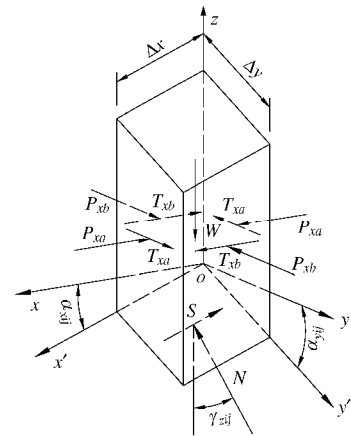


图 9 铅垂条块与受力情况

Fig. 9 Column and forces acting on it

式(9)没有考虑地震力、外荷载以及孔隙水压力。当需考虑地震力、外荷载以及孔隙水压力时, 只要在公式中加入地震力、外荷载以及孔隙水压力这些物理量, 参见文献[8]。

2 特殊问题处理

2.1 滑动体非对称

如图 10 所示,滑动体的不对称性在本文方法中主要表现为:①准线不对称;②长度不对称。由于通常三维土坡纵断面上的材料参数不一定相同,有时也会出现一定的坡度,因而会导致这两种情况的出现。

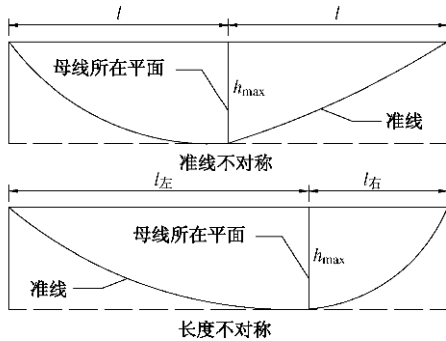


图 10 非对称模型

Fig. 10 Non-symmetrical model

处理方法是:对于准线不对称的情况,只需母线所在平面两边各自生成不同的准线;对于长度不对称的情况,滑动体两边取不同长度 $l_{左}$ 、 $l_{右}$,并且母线所在平面两边各自生成不同的准线。

2.2 母线不在滑动体内沿滑动方向上断面尺寸最大的面上

如图 11 所示,当母线所在平面 a 时,其母线在准线上移动到平面 b 时,可能不为封闭的面。处理方法是:如图 12 所示,将原土体加上虚线土体使之成为单一坡面的土体,这时在平面 a 上生成的母线一部分在原土体中,一部分在虚加土体中,并且能保证母线在滑动体内沿滑动方向上断面尺寸最大的面上,但在计算时需不考虑虚加土体上的滑动体。

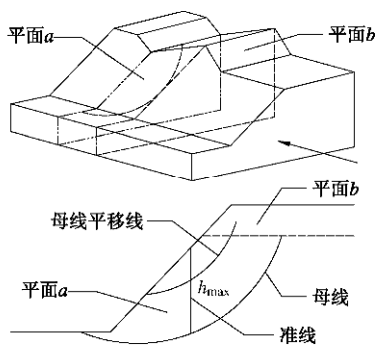


图 11 实际模型

Fig. 11 Actual model

2.3 含软弱夹层

当土层中包含有软弱夹层时,最危险滑动体可能不会穿过软弱夹层,因此当滑动体与软弱夹层相交时,其相交的部分而是以软弱夹层面为滑动面。

本文处理方法是:如图 13 所示,当随准线移动的母线与软弱夹层相交时,将处于软弱夹层下表面以下

的滑动面去除,如图 13 中的虚线,代以软弱夹层的下表面为滑动面。

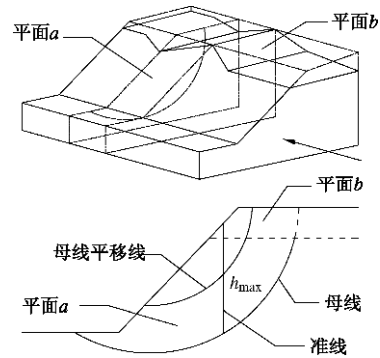


图 12 处理模型

Fig. 12 Processing model

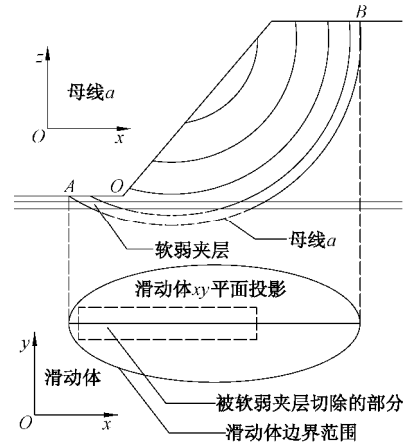


图 13 含软弱夹层时滑动体模型

Fig. 13 Model of sliding body with weak interlayer

3 三维土坡问题讨论

3.1 填挖方土坡

如图 14 所示,实际公路纵断面填挖模型,其中将材料不的土方挖去填入到填方路段,这时简化为如图 15 所示的模型,其中在模型的材料分界面左边全为填方土,右边全为原状土。

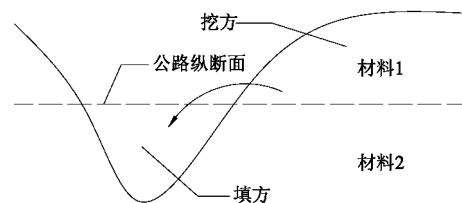


图 14 公路纵断面填挖方模型

Fig. 14 Excavation and filling model of vertical section of road

如图 15 所示,模型土坡坡高 $H=10\text{ m}$,坡比 $1:1$ 。材料 1: 重度 $\gamma=18.82\text{ kN/m}^3$,黏结力 $c=29.4\text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi=12.0^\circ$; 材料 2: 重度 $\gamma=18.82\text{ kN/m}^3$,黏结力 $c=101.4\text{ kPa}$,内摩擦角 $\varphi=34.7^\circ$ 。

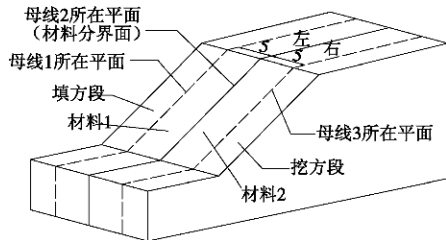


图 15 简化模型

Fig. 15 Simplified model

假定 3 条母线所在平面: 母线 1 在材料分界面左边 5 m 处的横断面上、母线 2 在材料分界面处的横断面上、母线 3 在材料分界面右边 5 m 处的横断面上, 并对其滑动体 l 取不同长度进行稳定性分析。

从表 1 和图 16 中可知: 取母线 1, 并当滑动体范围内包含材料 2 时, 随着滑动体的长度增加时, 计算出的最小安全系数在变大, 且随着滑动体在包含材料 2 的范围扩大时, 其计算出的安全系数也趋近于取母线 2 时计算出的安全系数; 取母线 3 时, 随着滑动体长度增大时, 其计算出的安全系数趋近于取母线 2 时计算出的安全系数。取母线 1、母线 2, 母线 3, 在滑动长度相同时, 其计算出的最小安全性介于两种材料组成的均质土坡计算出的最小安全系数之间, 且两种材料组成的均质土坡计算出的最小安全系数均高于对于材料在二维土坡中用简化 Bishop 法计算出的结果。

表 1 不同情况下的最小安全系数

Table 1 Minimum factors of safety under different situations

非单一均质材料土坡					
母线	l/m				
	2.5	5	10	15	20
1	1.893	1.615	2.136	2.227	2.368
2	4.013	3.553	3.007	2.836	2.771
3	6.459	5.654	4.156	3.617	3.402

单一均质材料土坡					
材料	l/m				
	2.5	5	10	15	20
材料 1	1.893	1.615	1.468	1.394	1.367
材料 2	6.459	5.654	4.998	4.742	4.649

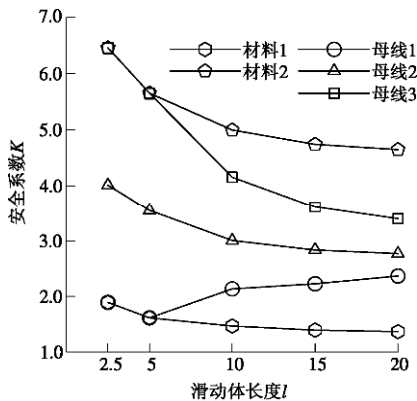


图 16 不同情况下的最小安全系数对比

Fig. 16 Comparison of minimum factors of safety under different situations

取母线 2 为研究对象, 对滑动体左右两边长度不等进行稳定性分析。从表 2 和图 17 中可得出: 当滑动体包含材料 1 的范围越大, 其计算出的最小安全系数越小; 当滑动体包含材料 2 的范围越大, 其计算出的最小安全系数越大, 因而潜在最危险滑动更偏于材料 1 所在的范围, 即更偏于抗滑稳定性较差的土体。当 $l_{左}=l_{右}=5\text{ m}$ 时的最危险滑动的立体图和俯视图如图 18, 19 所示。

表 2 滑动体左右长度不同时的最小安全系数

Table 2 Minimum factors of safety at different lengths between left and right sides of sliding body

$l_{左}/m$	$l_{右}/m$				
	5	10	15	20	25
5	3.553	3.765	3.924	4.020	4.116
10	2.719	3.007	3.253	3.444	3.593
15	2.282	2.577	2.836	3.036	3.206
20	2.068	2.332	2.571	2.771	2.945
25	1.918	2.154	2.372	2.564	2.732

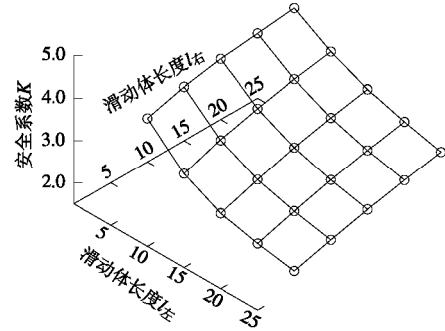


图 17 滑动体左右长度不同时的最小安全系数对比

Fig. 17 Comparison of minimum factors of safety at different lengths between left and right sides of sliding body

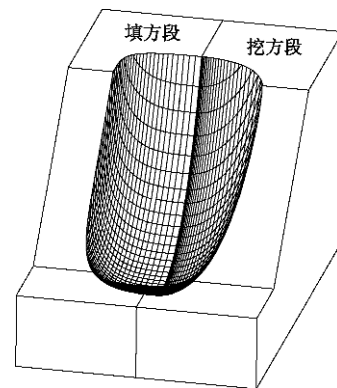


图 18 滑动面三维立体图 (母线 2, $l_{左}=l_{右}=5\text{ m}$)

Fig. 18 Three-dimensional map of sliding surface (mother line 2, $l_{左}=l_{右}=5\text{ m}$)

取母线 2 为研究对象, 滑动体的左右长度等于 5 m, 当挖方段和填方段的材料重度 γ 相同, ϕ/c 成一定比例时研究滑动体的对称性。

填方段的材料 1: 重度 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$, 黏结力 $c=40\text{ kPa}$, 内摩擦角 $\phi=32^\circ$ 。

挖方段的材料 2 选取 5 组, 参见表 3。

其中填方段和挖方段的材料 $\varphi/c=0.8$ (注明: φ/c 为无量纲, φ 的单位为度, c 的单位为 kPa)。

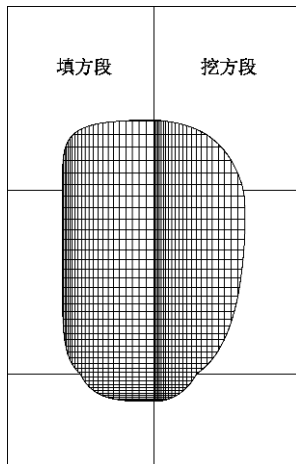


图 19 滑动面俯视图 (母线 2, $l_{左}=l_{右}=5\text{ m}$)

Fig. 19 Vertical view of sliding surface (mother line 2, $l_{左}=l_{右}=5\text{ m}$)

由表 4 和图 20 可得出: 以填方和挖方段的材料分界面为母线所在平面, 取滑动体的左右长度相等, 填方段和挖方段的材料重度 γ 相同, φ/c 成一定比例但不相同时, 则使用对称滑动面所得的结果与非对称滑动面所得的基本相近, 并且滑动面表现为对称性; φ/c 在一定比例下, 即使 φ 和 c 在减小, 但对滑动面的大小影响很小。

表 3 挖方段的材料参数

Table 3 Material parameters of excavation section

组数	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
1	18	30	24
2	18	25	20
3	18	20	16
4	18	15	12
5	18	10	8

表 4 不同情况下的最小安全系数

Table 4 Minimum factors of safety under different situations

滑动面采用方式	组数				
	1	2	3	4	5
对称	2.440	2.245	2.047	1.840	1.620
非对称	2.440	2.245	2.047	1.840	1.620

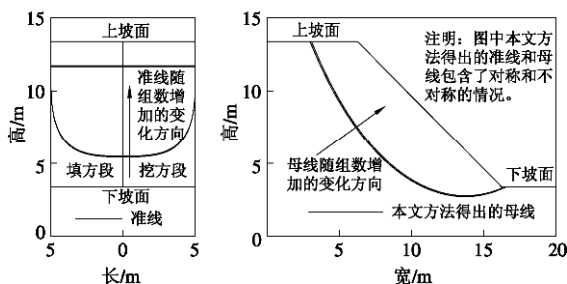


图 20 挖方段的材料参数不同时的准线和母线

Fig. 20 Standard line and mother line in case of different material parameters of excavation section

3.2 水平分层填方路堤

两层水平分层土坡, 坡高 $H=10\text{ m}$, 坡比为 1:2, 分层线在离坡顶坡高 5 m 处。下土层的材料参数为: 重度 $\gamma=18.5\text{ kN/m}^3$, 黏结力 $c=25\text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi=20^\circ$ 。上土层选取 3 组相比下土层材料抗滑稳定性差的材料, 参见表 5。

表 5 上土层材料参数

Table 5 Material parameters on upper soil

组数	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
1	18.5	20	15
2	18.5	15	10
3	18.5	10	5

取滑动体的左右长度为 5 m, 对水平分层路堤进行稳定性分析。由表 6 和图 21 可得出: 随着上土层材料的抗滑稳定性逐渐减小, 在上土层出现了局部稳定性, 与二维简化 Bishop 得到的结果一致, 因此可说明本文方法可以设定的滑动体长度范围内能够寻找到较优的最危险滑动面。

表 6 不同情况下的最小安全系数

Table 6 Minimum factors of safety under different situations

组数	方法		稳定性
	本文方法	二维简化 Bishop 法	
1	2.554	2.010	整体
2	2.405	1.932	整体
3	1.389	1.154	局部

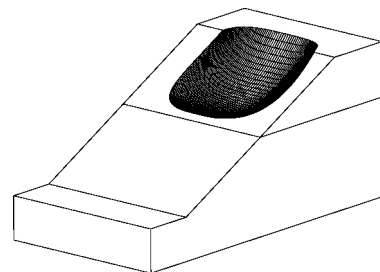


图 21 局部稳定性时滑动面三维立体图

Fig. 21 Three-dimensional map of sliding surface in case of part stability

3.3 公路纵断面为平斜坡的边坡

如图 22 所示, 土坡坡高 $H=10\text{ m}$, 坡比 1:1。土层参数: 重度 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$, 黏结力 $c=20\text{ kPa}$, 内摩擦角 $\varphi=15^\circ$ 。纵断面平斜坡角为 b , 取 $b=20^\circ$, 假定 3 条母线所在平面: 母线 1 在纵断面平斜坡转折面左边 5 m 处的横断面上、母线 2 在纵断面平斜坡转折面处的横断面上、母线 3 在纵断面平斜坡转折面右边 5 m 处的横断面上, 并对其滑动体 l 取不同长度进行稳定性分析。(注明: 对于左边斜坡部分在本文方法中, 由于母线的 h_{max} 的位置是变动的, 并且当母线在准线上移动, 很有可能在滑动体的左边长度未达到 l 时, 就超出坡面, 因此计算出的最危险滑动体不一定能使滑

动体的左边长度等于 l)。

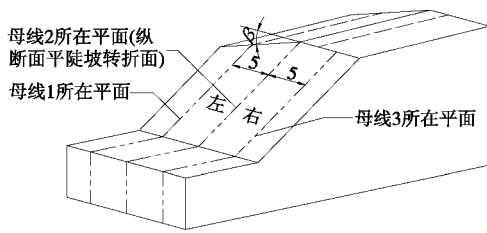


图 22 公路纵断面为平斜坡的边坡

Fig. 22 Vertical section of road with flat and oblique slope

由表 7 和图 23 中可知: 母线 3 计算出的最小安全系数相对最小, 即潜在最危险滑动面更偏于纵断面上的平坡段; 随着滑动体长度增加, 不管母线位置如何, 其三维稳定性趋于二维稳定性。

表 7 不同情况下的最小安全系数

Table 7 Minimum factors of safety under different situations

母线	l/m				
	2.5	5	10	15	20
1	1.698	1.421	1.338	1.301	1.293
2	1.604	1.357	1.267	1.231	1.224
3	1.596	1.341	1.237	1.197	1.193

注: 二维简化 Bishop 法得出的安全系数为 1.180。

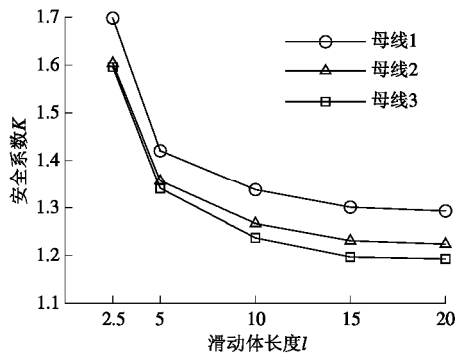


图 23 不同情况下的最小安全系数对比

Fig. 23 Comparison of minimum factors of safety under different situations

取母线 2, 滑动体长 $2l=10$ m, 对不同平斜坡角 b 进行分析, 由表 8 可知: 随着斜坡角 b 的增大, 其计算出的最小安全系数逐渐增大, 并且均大于 $b=0^\circ$ 的情况, 因而, 纵断面斜坡段对边坡稳定性有积极影响。

表 8 不同平斜坡角时的最小安全系数

Table 8 Minimum factors of safety at different angles of flat and oblique slopes

$b(^{\circ})$	0	5	10	15	20
安全系数	1.234	1.243	1.250	1.259	1.267

取母线 2, 对滑动体左右长度不等进行分析, 由表 9 和图 24 可知: 随着右边平坡段的滑动体长度的增加, 其计算出的最小安全系数逐渐减小; 随着左边斜坡段的滑动体长度的增加, 其计算出的最小安全系数先减小后增大, 这也说明纵断面斜坡段在一定范围

内对边坡稳定性有积极影响。当母线 2, $l_{左}=10$ m, $l_{右}=20$ m 时的最危险滑动的立体图如图 25 所示。

表 9 滑动体左右长度不同高时的最小安全系数

Table 9 Minimum factors of safety at different lengths between left and right sides of sliding body

$l_{左}/m$	$l_{右}/m$				
	5	10	15	20	25
5	1.357	1.284	1.235	1.204	1.189
10	1.318	1.267	1.226	1.206	1.189
15	1.322	1.269	1.231	1.211	1.194
20	1.337	1.285	1.247	1.224	1.202
25	1.352	1.300	1.261	1.239	1.221

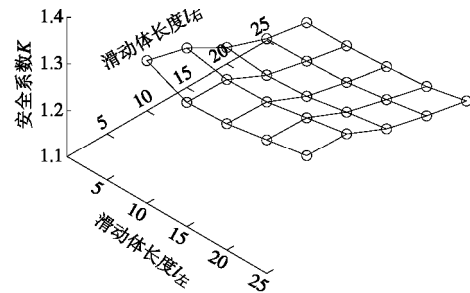


图 24 滑动体的左右长度不同高时的最小安全系数对比

Fig. 24 Comparison of minimum factors of safety at different lengths between left and right sides of sliding body

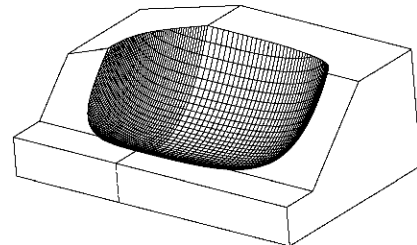


图 25 滑动面三维立体图 (母线 2, $l_{左}=10$ m, $l_{右}=20$ m)

Fig. 25 Three-dimensional map of sliding surface

(mother line 2, $l_{左}=10$ m, $l_{右}=20$ m)

3.4 含软弱夹层的土坡

参考文献[17], 土坡坡高 $H=12.2$ m, 坡比 1:2。土层: 重度 $\gamma=18.8$ kN/m³, 黏结力 $c=29$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=20^\circ$; 软弱夹层: 在坡面以下 0.75 m 处, 厚度为 0.5 m, 重度 $\gamma=18.8$ kN/m³, 黏结力 $c=0$ kPa, 内摩擦角 $\varphi=10^\circ$ 。分别取滑动体的长度 l 为 5, 10, 15, 30 和 50 m 来对含软弱夹层边坡的三维稳定性进行研究。

当 $l=10$ m 时的三维最危险滑动面见图 26。

从表 10 和图 27 中可得出: 随着滑动体的长度 l 的增加, 安全系数逐渐减小, 但减小的幅度也在减小, 直到趋近于一个定值, 而这个定值就是二维平面计算出的结果, 说明含软弱夹层的土坡在滑动体无限长时可简化为二维平面问题。

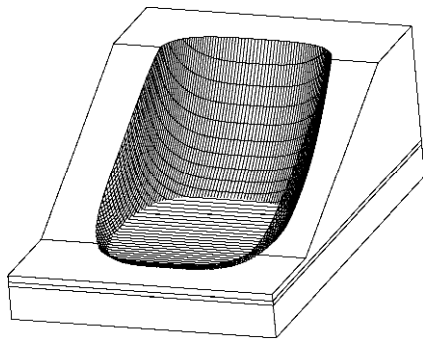


图 26 含软弱夹层土坡滑动面三维立体图 ($l=10\text{ m}$)

Fig. 26 Three-dimensional map of sliding surface with weak interlayer

表 10 滑动体在不同长度时的安全系数

Table 10 Minimum factors of safety at different lengths of sliding body

l/m	5	10	15	30	50
安全系数	2.267	1.962	1.805	1.687	1.649
(二维简化 Bishop 法得出的安全系数 1.524)					

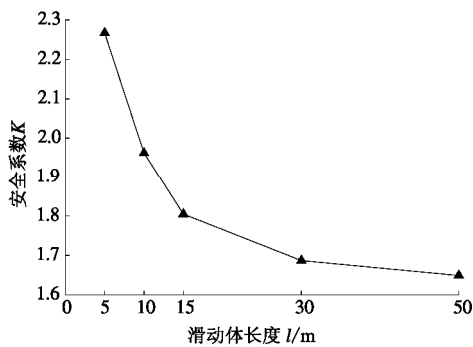


图 27 滑动体不同长度时安全系数对比

Fig. 27 Comparison of minimum factors of safety at different lengths of sliding body

从图 28 中可得出, 三维母线(这里指的是经与软弱夹层下表面修正后的母线)与二维滑动面比较相似; 随着滑动体长度的增加, 其母线趋近一致, 这也说明当滑动体长度无限长时, 三维立体问题可简化为二维平面问题。

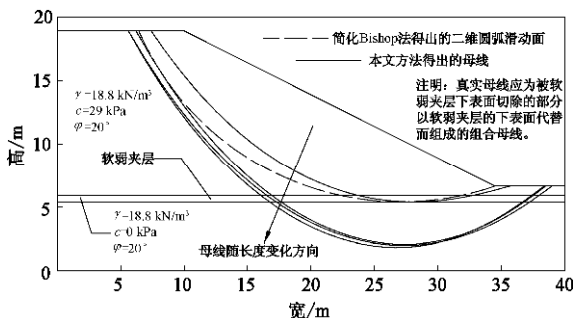


图 28 含软弱夹层土坡三维母线与二维滑动面对比

Fig. 28 Comparison between three-dimensional mother lines and two-dimensional sliding surfaces of slope with weak interlayer

为了便于比较, 本文取滑动体长度 $l=78.2\text{ m}$ (即文献[17]中所述的椭球 y 轴方向半轴长)。从表 11 中可以看出本文方法得出的结果与其他方法非常接近, 说明本文方法可行。

表 11 最小安全系数对比

Table 11 Comparison of minimum factors of safety

本文方法	Zhang Xing (1988) ^[9]	Hung & Tsai (1989) ^[5]	Lam & Fredlund (1993) ^[12]
1.632	1.553	1.620	1.603
Hung & Tsai (2000) ^[2]	STAB-3D ^[17]	上限解 ^[15,16] (Chen et al, 2001, a, b)	
1.658	1.640	1.717	

4 结 论

(1) 本文针对滑动体不对称、母线不在滑动体内沿滑动方向上断面尺寸最大的面上和含软弱夹层土坡的三维边坡问题, 采取了一些相应解决措施, 并通过算例分析, 得到了比较合理的结果。

(2) 对于填挖方土坡, 当填方段和挖方段处的材料不相同, 其中一段的材料具有较强的抗滑稳定性, 而滑动体包含这两种材料时, 其滑动面表现为不对称, 且滑动体偏向于稳定性较弱的材料时, 其计算出的最小安全系数越小, 因而潜在最危险滑动面最有可能发生在较弱的材料处。同时, 以填方段和挖方段的材料分界面为母线所在平面, 取滑动体的左右长度相等, 当填方段和挖方段的材料重度相同, φ 和 c 不相同, 但 φ/c 相同时, 使用对称滑动面计算出的结果 (包括安全系数和最危险滑动面) 与非对称滑动面计算出的结果相近, 且 φ 和 c 的减小对滑动体的大小影响不大。

(3) 本文方法对两层水平分层填土路基分析中, 随着上土层材料的抗滑稳定性相对下土层材料的抗滑稳定越来越差时, 在上土层出现了局部滑动面, 可说明本文方法不仅能够应用于一些较复杂的土坡稳定性分析, 且能够寻找到较优的最危险滑动面, 包括整体和局部稳定性。

(4) 对于公路纵断面为平斜坡的边坡, 其最危险滑动面更偏于平坡段; 一定的平斜坡角和滑动体在斜坡内一定长度时, 其计算出的安全系数增大, 因而纵断面上的斜坡对边坡的稳定性有一定的积极影响;

(5) 对于含软弱夹层的土坡来说, 当滑动体无限长时, 其三维稳定性趋于二维稳定性。同时, 通过与以往研究成果相比较, 本文方法得出的最小安全系数与其他方法得出的结果非常接近, 证明本文方法的可行性。

在此需说明的是: 上述所举算例是在无限长单一

坡面的情况下进行的,因此固定了滑动体的长度,而实际工程中,自然边坡或路堤边坡并非为无限长单一坡面,这时即可按照本文方法将滑动体的长度设定在一个范围内,按一定步长进行搜索。

参考文献:

- [1] HUNGR O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimension[J]. *Géotechnique*, 1987, **37**(1): 113 - 117.
- [2] HUANG C C, TSAI C C. New method for 3D and asymmetrical slope stability analysis[J]. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, 2000, **126**(10): 917 - 927.
- [3] HOVLAND H J. Three-dimensional slope stability analysis method[J]. *Journal Geotechnical Engineering, ASCE*, 1977, **103**(9): 971 - 986.
- [4] CHEN R H, Chameau J L. Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes[J]. *Géotechnique*, 1982, **32**(3): 31 - 40.
- [5] HUNGR O, SALGADO F M, BYRNE P M. Evaluation of a three dimensional method of slope-stability analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1989, **26**(4): 679 - 686.
- [6] CHEN Zu-yu, MI Hong-liang, ZHANG Fa-ming, et al. A simplified method for 3D slope stability analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2003, **40**(3): 675 - 683.
- [7] UGAI K, HOSOBORI K. Extension of simplified Bishop method, simplified Janbu method and spencer method to three-dimnsiom[C]// *Proceeding of Japanese Society of Civil Engineers*. Tokyo: [s.n.], 1988: 21 - 26. (in Japanese)
- [8] 冯树仁, 丰定祥, 葛修润, 等. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. *岩土工程学报*, 1999, **21**(6): 657 - 661. (FENG Shu-ren, FENG Ding-xiang, GE Xiu-run, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, **21**(6): 657 - 661. (in Chinese))
- [9] XING Z. Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view[J]. *Journal Geotechnical Engineering*, 1988, **114**(6): 658 - 671.
- [10] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. *岩土工程学报*, 2001, **23**(5): 525 - 529. (CHEN Zu-yu, MI Hong-liang, WANG Xiao-gang. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(5): 525 - 529. (in Chinese))
- [11] BALIGH M M, AZZOUZ A S. End effects on cohesive slopes[J]. *Journal Geotechnical Engineering, ASCE*, 1975, **101**(11): 1105 - 1107.
- [12] LAM L, FREDLUND D G A. general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, **30**(6): 905 - 919.
- [13] HUTCHINSON J N, SARMA S K. Discussion on three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes[J]. *Géotechnique*, 1985, **35**(6): 215 - 216.
- [14] LAM L, FREDLUND D G A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, **30**(4): 905 - 919.
- [15] CHEN Zu-yu, WANG Xiao-gang, HAHERFIELD C, et al. A three-dimensional slope stability 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.
- [16] CHEN Zu-yu, WANG Jian, WANG Yu-jie, et al. A three-dimensional slope stability method using the upper bound theorem, part II: numerical apprnaches[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, **38**(2): 379 - 397.
- [17] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析——原理、方法、程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (CHEN Zu-yu. *Soil slope stability analysis—principle—procedures*[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2003. (in Chinese))
- [18] 张永兴. 边坡工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (ZHANG Yong-xing. *Slope engineering*[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008. (in Chinese))