

# 预应力锚索加固土质边坡极限平衡稳定性分析\*

邓东平 李亮 罗强

(中南大学土木工程学院 长沙 410075)

**摘要** 基于滑动面搜索新方法,对预应力锚索加固边坡进行稳定性分析。通过将锚索的加固效应简化为作用在土条(柱)底面上的一个外力,实现了条分(柱)法下二维和三维锚索加固边坡的安全系数计算。经过算例对比分析,验证了本文方法的可行性,然后,在一定程度上研究了锚索倾角 $\theta$ 、三维滑动体长度 $L$ 、锚索锚固力 $F$ 以及水平加固间距 $S$ 变化时对边坡稳定性的影响。研究表明:(1)锚索加固可有效提高边坡的稳定性,同时,也增大了原有边坡发生滑动的范围;(2)随着三维滑动体长度 $L$ 的增大,三维边坡(包括未加固和锚索加固)的稳定性趋于二维边坡稳定性;(3)单位水平加固间距上的锚固力越大,锚索对边坡的加固效应越明显。

**关键词** 边坡工程 二维和三维滑动面 预应力锚索 安全系数

**中图分类号**:Tu441<sup>+</sup>.35 **文献标识码**:A

## LIMIT EQUILIBRIUM ANALYSIS ON STABILITY OF SOIL SLOPES REINFORCED WITH PRE-TENSIONED CABLES

DENG Dongping LI Liang LUO Qiang

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

**Abstract** This paper presents a new method of searching for sliding surface and uses it for stability analysis of slopes reinforced with pre-tensioned cables. The reinforcement effect of cables is simplified to an external force on the bottom surface of the soil section (column) when the slice methods are used. The formula for calculating the factor of safety ( $FOS$ ) is achieved in two-dimensional (2D) or three-dimensional (3D) slopes reinforced with pre-tensioned cables. Some examples are compared and analyzed. The feasibility of the proposed method is verified. Then in a certain extent, the effect on the slope stability with change of cable angle ( $\theta$ ), length of three-dimensional sliding body ( $L$ ), anchorage force of cable ( $F$ ) and horizontal space of reinforcement cable ( $S$ ) is researched. The numerical results show the follows. (1) Cables can effectively improve the stability of slope, and can increase the range of original slope's sliding surface. (2) As the three-dimension sliding body length ( $L$ ) increases, the stability of 3D slopes (including non-reinforcement slope and slopes reinforced with cables) tends to the stability of 2D slopes. (3) the greater anchorage force of per meter horizontal reinforcement spacing is, the more anchor cable's reinforcement effect on the slope is.

**Key words** Slope engineering, Two-dimensional and three-dimensional sliding surface, Pre-tensioned cable, Factor of safety ( $FOS$ )

\* 收稿日期: 2012-01-05; 收到修改稿日期: 2012-07-22.

**基金项目**: 湖南省研究生科研创新项目(CX2012B056)、国家自然科学基金项目资助(51078359)和贵州省交通运输厅科技项目(2010-122-020).

**第一作者简介**: 邓东平, 主要从事道路与铁道工程方面的研究. Email: dengdp851112@126.com

# 1 引言

高速公路和铁路建设经过山区时,由于技术需要而进行了一定程度的开挖和填方,从而破坏了原有边坡的稳定状态。另外,为确保在建或竣工运营道路的安全运行,以及避免实际工程当中由于外部荷载等因素作用下所引发边坡失稳,工程上常对这些处于潜在不稳定的边坡进行一定程度的加固。因此,对加固条件下边坡稳定性进行研究是一项十分有意义的工作<sup>[1]</sup>。然而,现有理论对有加固措施的边坡稳定性分析还不够深入,尤其是在三维领域方面。

边坡加固中可供选择的技术方案包括:抗滑桩、锚杆、预应力锚索等。其中,预应力锚索因适用性较广,能对高、陡及地质条件较差的边坡进行加固而在实际工程中应用普遍,并成为大多学者研究的对象之一。现有加锚(索)边坡稳定性分析的方法中,有极限平衡法<sup>[2,3]</sup>,极限分析法<sup>[4]</sup>和数值模拟法<sup>[1,5-9]</sup>等。上述方法具有各自的优缺点。对于极限平衡法来说,一方面,由于计算简单,理论相对成熟,可满足工程的需要,另一方面,在极限平衡分析时,可将锚索锚固力简化为施加在条(柱)底中间的一个拉力或条(柱)块顶部的一个压力来考虑其对边坡所起的加固作用,因而,它乃是一种使用较为普遍的方法<sup>[2]</sup>。

目前,对加锚边坡进行极限平衡稳定性分析中,以往研究成果还存在一些不足,如对锚索加固参数分析研究还不够全面,且在分析时常将此类边坡常简化为二维稳定性问题,然而,实际的锚索布置和边坡是呈三维状态,对其仅进行二维稳定性分析不能反映其空间效应。

本文基于滑动面搜索新方法和竖直条分法,将锚索的加固作用简化为作用在土条(柱)底面上的一个外力,并推导出了二、三维锚索加固边坡的简化 Janbu 法安全系数计算公式,进而对预应力锚索加固边坡进行稳定性分析。在经算例对比验证本文方法的可行性后,研究了锚索倾角  $\theta$ 、三维滑动体长度  $L$ 、锚索锚固力  $F$  和水平加固间距  $S$  变化对边坡稳定性的影响。

## 2 滑动面生成和搜索与安全系数计算

### 2.1 滑动面的生成与搜索

#### 2.1.1 二维滑动面

邓东平等<sup>[10]</sup>在对二维滑动面生成方法进行研

究的基础上,提出了一种通过使用随机角生成随机曲线滑动面的新方法,并进而通过对曲线的生成规律进行分析,将随机曲线的生成改进为土条划分和角度划分相结合的任意曲线滑动面生成方法。分析表明该方法能够较好地与各种条分法相结合,适用性较广,且滑动面型式任意。因而,本文采用此方法生成二维任意曲线滑动面。

#### 2.1.2 三维滑动面

邓东平等<sup>[11]</sup>和李亮等<sup>[12]</sup>在文献[10]所提出的二维任意曲线滑动面的基础上建立由母线和准线相互平行移动而得到三维任意曲线滑动面的方法,其中,准线和母线的生成与文献[10]中的二维曲线生成方法一致。经研究表明<sup>[13-15]</sup>,这样生成的三维任意曲线滑动面能对三维简单和复杂情况下的边坡进行稳定性分析,因此,本文采用此方法生成三维任意曲线滑动面。

## 2.2 安全系数计算

### 2.2.1 二维锚索加固边坡的安全系数计算

如图1,在锚索加固条件下,竖直土条  $i$  受到如下作用力:  $W_i$  为重力;  $F$  为锚索锚固力,其在水平和竖直方向上的分量分别为  $F_x$  和  $F_y$ ;  $H_{i-1}$  和  $H_i$ 、 $P_{i-1}$  和  $P_i$ 、 $N_i$  和  $T_i$  分别为土条  $i$  两侧条间剪切力、两侧条间法向力及滑动底面上的法向力和剪切力,其中,滑动面发生滑动时满足摩尔-库伦破坏准则。在图1中,为了表明锚索的加固位置,将锚索加固位置依次从坡角向上命名为锚索1、锚索  $i$  和锚索  $n$ ,且它们离坡角点的竖直距离分别为  $Y_1$ 、 $Y_i$ 、 $Y_n$ 。对于二维锚索加固边坡采用简化 Janbu 法计算安全系数,计算公式如式(1)、(2)。

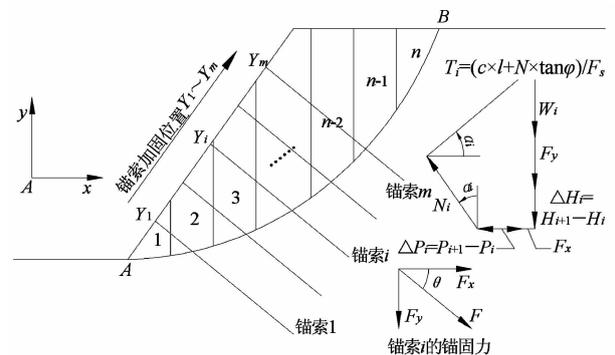


图1 锚索加固条件下 Janbu 条分法计算模型  
Fig. 1 Calculation model of Janbu slice method in slopes reinforced with pre-tensioned cables

$$F_S = \left[ \sum_{i=1}^n (c \cdot b_i + W_i \cdot \tan\varphi) / m_{\theta k} + \sum_{k=1}^m \frac{F}{S} \cdot \sin\theta \cdot \tan\varphi / m_{\theta k} \right] / \left[ \sum_{i=1}^n W_i \cdot \sin\alpha_i + \sum_{k=1}^m \frac{F}{S} \cdot (\sin\theta \cdot \sin\alpha_k - \cos\theta \cdot \cos\alpha_k) \right] \quad (1)$$

$$m_{\theta i} = \cos\alpha_i + \frac{\sin\alpha_i \tan\varphi}{F_S} \quad (2)$$

式中,  $F_S$  为边坡稳定安全系数;  $\alpha_i$  为土条  $i$  底面曲线中心点切线夹角;  $b_i$  为土条  $i$  宽度;  $c$  为土条  $i$  底面上土的黏聚力;  $\varphi$  为土条  $i$  底面上土的内摩擦角;  $\theta$  为锚索锚固倾角(即锚索与水平方向  $Ax$  之间的夹角);  $m$  为加固锚索排数;  $S$  为锚索水平加固间距。其中,  $\alpha_k$ 、 $m_{\theta k}$  均为锚索  $k$  对应加固滑动土条底面上的参数。在本文中,令单位水平加固间距上的锚固力为  $f$ 。

### 2.2.2 三维锚索加固边坡的安全系数计算

如图2所示,在三维锚索加固边坡中,通过忽略条块  $i$  中4个侧面上沿铅垂方向( $z$ 方向)的剪力,并将锚索加固力简化成  $xz$  平面内在滑动底面上的一个集中力,来推导三维锚索加固边坡的安全系数计算公式。在未加锚索时,文献[16]经过计算对比分析,验证了近似忽略条块  $i$  侧面上一些剪力这种做法的可行性,并且这种方法简单而实用。

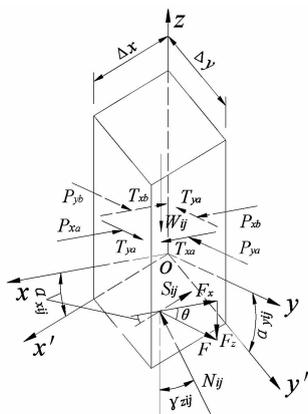


图2 考虑锚索条件下铅垂条柱的受力模型

Fig. 2 Force analysis model of the vertical slice column in slopes reinforced with pre-tensioned cables

以土柱  $ij$  的滑动底面上一角点为原点建立起三维坐标系。 $ox'$  和  $oy'$  分别为滑动底面两底边方向;  $N_{ij}$ 、 $S_{ij}$  分别为滑动面底面上的法向力和剪切力;  $F$  为锚索锚固力,  $F_x$ 、 $F_z$  分别为  $F$  在  $x$ 、 $z$  方向上的分量,其中,  $F_x = F \cos\theta$ ,  $F_z = F \sin\theta$ ;  $P_{xa}$ 、 $P_{xb}$ 、 $P_{ya}$ 、 $P_{yb}$  分别为土柱  $ij$  两侧面平行于  $x$ 、 $y$  方向的法向力;  $T_{xa}$ 、 $T_{xb}$ 、 $T_{ya}$ 、 $T_{yb}$  分别为土柱  $ij$  两侧面平行于  $x$ 、 $y$  方向的剪切力。安全系数计算过程如下:

由铅垂方向力的平衡,可得:

$$N_{ij} \cos\gamma_{zij} + S_{ij} \sin\alpha_{xij} = W_{ij} + F_z \quad (3)$$

由滑动底面满足摩尔-库伦准则,可知:  $S_{ij} = (c \cdot A_{ij} + N_{ij} \cdot \tan\varphi) / F_s$ , 代入式(3)可得:

$$N_{ij} = \frac{W_{ij} + F \cdot \sin\theta - \frac{c \cdot A_{ij}}{F_s} \sin\alpha_{xij}}{\cos\gamma_{zij} + \frac{\tan\varphi}{F_s} \sin\alpha_{xij}} \quad (4)$$

由  $ox'$  方向力的平衡,可得:

$$S_{ij} = - (P_{xa} - P_{xb} + T_{xb} - T_{xa}) \cdot \cos\alpha_{xij} - F_x \cdot \cos\alpha_{xij} + (W_{ij} + F_z) \cdot \sin\alpha_{xij} \quad (5)$$

将式(5)进行变换,可得式(6)。

$$P_{xa} - P_{xb} + T_{xb} - T_{xa} = -S_{ij} \cdot \sec\alpha_{xij} - F_x + (W_{ij} + F_z) \cdot \tan\alpha_{xij} \quad (6)$$

由于条间相互作用成对出现,则有  $\sum (P_{xa} - P_{xb} + T_{xb} - T_{xa}) = 0$ , 同时,将  $N_{ij}$  和  $S_{ij}$  的关系代入式(6)可得:

$$-\sum \frac{\sec\alpha_{xij}}{F_s} (c \cdot A_{ij} + N_{ij} \cdot \tan\varphi) + \sum W_{ij} \cdot \tan\alpha_{xij} + \sum F \cdot (\sin\theta \cdot \tan\alpha_{xij} - \cos\theta) = 0 \quad (7)$$

由式(7)变换可得式(8)。

$$F_S = \frac{\sum \sec\alpha_{xij} (c \cdot A_{ij} + N_{ij} \cdot \tan\varphi)}{\sum W_{ij} \cdot \tan\alpha_{xij} + \sum F \cdot (\sin\theta \cdot \tan\alpha_{xij} - \cos\theta)} \quad (8)$$

将式(4)代入式(8)可得锚索加固边坡时的安全系数计算公式如式(9)。

$$F_S = \left[ \sum_i^n \sum_j^m (c \cdot A_{ij} \cdot \cos\gamma_{zij} + W_{ij} \cdot \tan\varphi) / m_{\theta ij} + \sum_k^s F \cdot \sin\theta \cdot \tan\varphi / m_{\theta ij} \right] / \left[ \sum_i^n \sum_j^m W_{ij} \tan\alpha_{xij} + \sum_k^s F (\sin\theta \tan\alpha_{xij} - \cos\theta) \right] \quad (9)$$

$$\text{其中, } m_{\theta ij} = \frac{\cos\gamma_{zij} + \frac{\tan\varphi}{F_s} \sin\alpha_{xij}}{\sec\alpha_{xij}}$$

式中,  $A_{ij}$  为条块  $(i, j)$  滑面上条块的底面积;  $W_{ij}$  为条块  $(i, j)$  的重量;  $\gamma_{zij}$  为滑面  $ij$  的法向与  $oz$  轴的夹角;  $\alpha_{xij}$  为  $ox$  轴与  $ox'$  的夹角;  $c$ 、 $\varphi$ 、 $F$ 、 $\theta$  与前述意义相同。

需说明的是,采用二维和三维简化 Janbu 法对条间力进行了简化,但对边坡稳定性分析的结果影响不大,且对收敛速度起到了一定的提高。

## 3 边坡预应力锚索加固效应讨论

### 3.1 算例对比分析

算例1:边坡<sup>[2]</sup>坡高  $H=10\text{m}$ ,坡比 1:2,土层参数为  $\gamma=20\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c=3.0\text{kPa}$ ,  $\varphi=19.6^\circ$ ,锚(杆)索加固位置为  $Y_1=3\text{m}$ ,  $Y_2=4.5\text{m}$ ,  $Y_3=6\text{m}$ ,单位水平加固间距  $S$  上的锚固力  $F=20\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。当锚(杆)索倾角  $\theta$  分别为  $30^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $45^\circ$  时,新方法与文献[2](表1)。

表1 算例1安全系数对比

Table 1 Contrast of factor of safe(*FOS*) in example 1

锚固角 $\theta/(\circ)$		30	35	40	45
文献[2]	极限平衡法	1.150	1.139	1.126	1.115
	数值模拟	1.14	1.13	1.12	1.10
新方法		1.102	1.096	1.089	1.081

算例2:边坡<sup>[4]</sup>坡高  $H=13.7\text{m}$ ,坡角  $\beta=30^\circ$ ,土层参数为  $\gamma=19.63\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c=23.94\text{kPa}$ ,  $\varphi=10^\circ$ ,锚索倾角  $\theta=15^\circ$ ,单位水平加固间距上的锚固力  $f=500\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。当锚索加固位置  $Y_1$  分别为  $4\text{m}$ 、 $6\text{m}$ 、 $8\text{m}$ 、 $10\text{m}$  时,新方法与文献[4]方法计算得到的最小安全系数对比见表2。

表2 算例2安全系数对比

Table 2 Contrast of *FOS* in example 2

加固位置 $Y_1/\text{m}$	4	6	8	10
极限分析上限法 <sup>[4]</sup>	1.550	1.473	1.386	1.299
新方法	1.231	1.219	1.210	1.197

从表1、表2中可知:本文方法在不同锚索加固状态下,计算得到的最小安全系数与以往研究结果接近,说明本文方法的可行性。

### 3.2 简单锚索加固边坡

#### 3.2.1 二维稳定性分析

边坡坡高  $H=10\text{m}$ ,坡比 1:1,土层参数为: $\gamma=20\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c=10\text{kPa}$ ,  $\varphi=20^\circ$ 。锚索加固位置为  $Y_1=3\text{m}$  和  $Y_2=7\text{m}$ ,单位水平加固间距上的锚固力  $f=200\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。考虑锚索倾角  $\theta$  变化时对边坡稳定性的影响(表3和图3,图4)。

从表3中可知:锚索加固边坡相比未加固边坡

表3 未加固边坡与不同锚索倾角时加固边坡最小安全系数  
Table 3 The minimum *FOS* in general slope and slope reinforced with pre-tensioned cables in different angles

计算方法	未加固	锚索与水平方向的夹角 $\theta/(\circ)$			
		0	3	6	9
本文方法	0.902	1.522	1.502	1.490	1.463
简化 Bishop 圆弧法	0.913	1.620	1.614	1.607	1.600
Janbu 圆弧法	0.916	1.581	1.575	1.569	1.563

计算方法	锚索与水平方向的夹角 $\theta/(\circ)$				
	12	15	18	21	24
本文方法	1.443	1.428	1.405	1.390	1.366
简化 Bishop 圆弧法	1.591	1.582	1.573	1.562	1.550
Janbu 圆弧法	1.554	1.545	1.534	1.523	1.511

的稳定性得到了明显的改善,且随着锚索倾角  $\theta$  的增大,边坡的稳定性逐渐变差。

从图3中可知:本文方法计算得的最小安全系数较简化 Bishop 圆弧法、Janbu 圆弧法要小,但相差不大,产生差别的主要原因在于锚索对边坡所施加的加固力与其所在土条处的底面倾角有关,而对临界滑动面进行搜索时,因为圆弧滑动面并不一定为最危险滑动面,所以圆弧滑动面在一定程度上限制了土条底面倾角,导致计算得的最小安全系数也相应偏大。

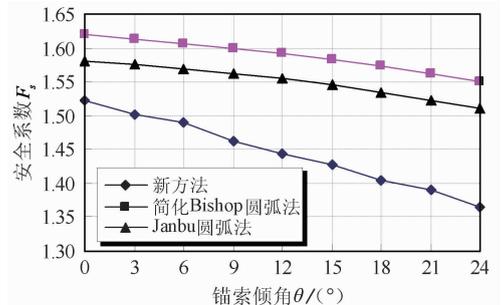


图3 不同锚索倾角时加固边坡的安全系数对比

Fig. 3 Contrast of *FOS* in slope reinforced with pre-tensioned cables in different angles

从图4a、4b可知:(1)锚索加固边坡较未加固边坡搜索到的临界滑动面的范围增大,表明锚索加固在增强边坡稳定性的同时,也增大了边坡潜在的滑动范围;(2)从不同锚索加固倾角下计算得的临界滑动面的位置来看,锚索倾角  $\theta$  的变化基本上对滑动面的位置影响不大;(3)未加固时,本文方法得到的临界滑动面与临界圆弧滑动面基本一致,锚索加固时,本文方法得到临界滑动面与临界圆弧滑动

面接近,但在滑动面下滑段处较圆弧滑动面更下凹些,呈非圆弧形。

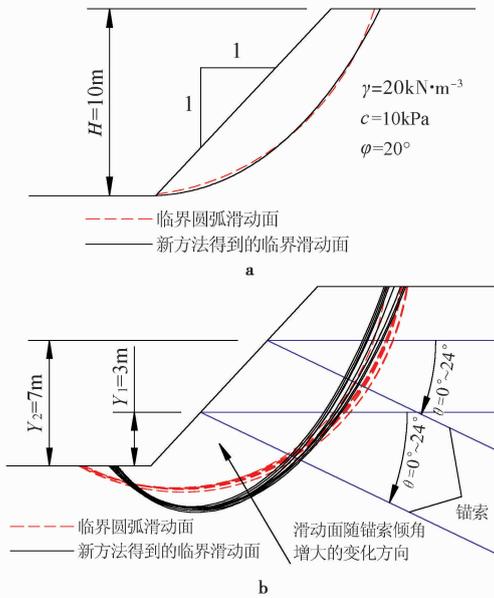


图4 简单边坡临界滑动面

Fig. 4 The critical sliding surface of a simple slope  
a. 未加固边坡; b. 不同锚索倾角时的加固边坡

### 3.2.2 三维稳定性分析

取边坡外形、土层参数和锚索加固位置与3.2.1节算例相同。为研究锚索加固边坡的三维空间效应,设水平加固间距  $S=4\text{m}$ , 锚索锚固力  $F=$

$400\text{kN}$ ,即单位水平加固间距上的锚固力  $f=50\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ , 锚索倾角  $\theta=15^\circ$ 。当三维滑动体长度  $L$  变化时三维边坡计算得到的最小安全系数见图5, 临界滑动面如图6所示。

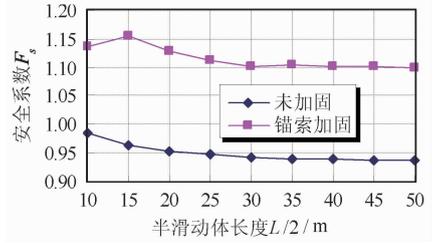


图5 不同滑动体长度时三维未加固边坡和锚索加固边坡的安全系数对比

Fig. 5 Contrast of FOS in general slope and slope reinforced with pre-tensioned cables in different lengths of three-dimensional sliding body

从图5中可知:(1)当单位水平加固间距上的锚固力  $f=50\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 时,锚索加固边坡相比未加固边坡的稳定性也得到了一定的改善,而相比表3中单位水平加固间距上的锚固力  $f=200\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 时二维边坡计算得的安全系数要小,说明单位水平加固间距上的锚固力越大对边坡的加固效应越明显;(2)随着三维滑动体长度  $L$  的增大,锚索加固和未加固边坡计算得的最小安全系数曲线趋于平缓,即趋近于一个定值。对比表3和图6中未加固边坡的数据,

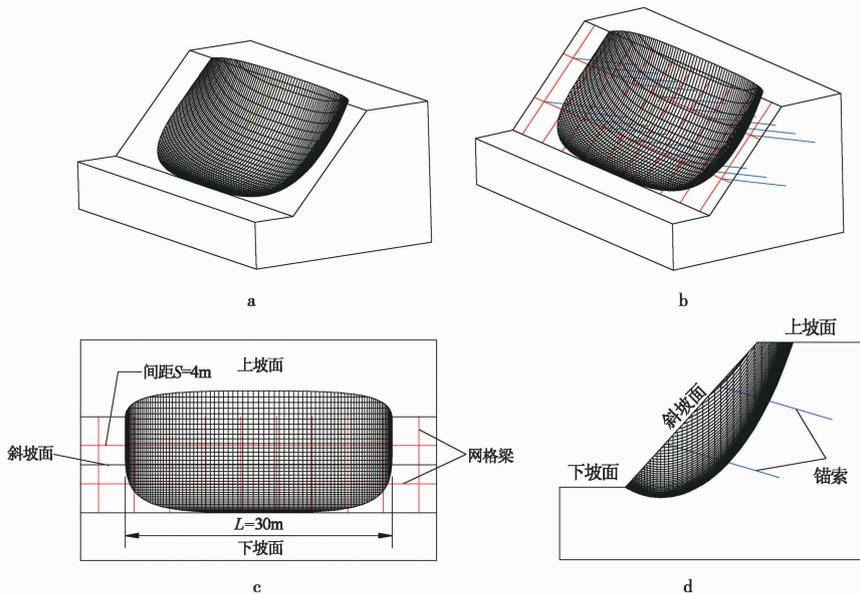


图6 未加固边坡与锚索加固简单边坡的三维滑动面

Fig. 6 Three-dimensional sliding surface in general simple slope and simple slope reinforced with pre-tensioned cables

- a. 未加固边坡立体图 ( $L/2=15\text{m}$ ); b. 锚索加固边坡立体图 ( $L/2=15\text{m}$ );  
c. 锚索加固边坡俯视图 ( $L/2=15\text{m}$ ); d. 锚索加固边坡侧面图 ( $L/2=15\text{m}$ )

说明随着三维滑动体长度  $L$  的增大,三维边坡计算得的安全系数趋于二维边坡计算得的安全系数。

### 3.3 多级锚索加固边坡

#### 3.3.1 二维稳定性分析

一级边坡坡高  $H_1 = 10\text{m}$ ,坡角  $\beta_1 = 60^\circ$ ,二级边坡坡高  $H_2 = 5\text{m}$ ,坡角  $\beta_2 = 45^\circ$ ,土层参数为  $\gamma = 19.5\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $c = 15\text{kPa}$ ,  $\varphi = 25^\circ$ ,锚索加固位置为  $Y_1 = 3\text{m}$ ,  $Y_2 = 8\text{m}$ ,  $Y_3 = 12.5\text{m}$ ,锚索倾角  $\theta = 20^\circ$ 。研究单位水平加固间距上的锚索锚固力  $f$  变化对边坡稳定性的影响(表4,图7)。

表4 未加固边坡与不同锚固力时加固边坡最小安全系数

计算方法	未加固	单位水平加固间距上的锚索锚固力 $f/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$			
		200	250	300	350
新方法	0.931	1.440	1.533	1.615	1.698
简化 Bishop 圆弧法	0.976	1.572	1.693	1.804	1.890
Janbu 圆弧法	0.977	1.568	1.676	1.772	1.853

计算方法	单位水平加固间距上的锚索锚固力 $f/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$				
	400	450	500	550	600
新方法	1.781	1.798	1.860	1.922	1.970
简化 Bishop 圆弧法	1.970	2.047	2.119	2.188	2.255
Janbu 圆弧法	1.934	2.014	2.088	2.154	2.219

从表4和图7中可知:随着单位水平加固间距上的锚固力  $f$  的增大,计算得的安全系数逐渐增大,且新方法得到的结果相比简化 Bishop 圆弧法和 Janbu 圆弧同样要小,但相差不大。

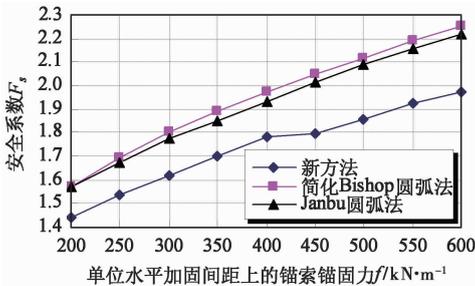


图7 不同加固状态时边坡的安全系数对比

Fig. 7 Contrast of FOS in slope reinforced with pre-tensioned cables under different conditions

图8a和图8b同样表明,锚索的加固效应不仅提高了边坡的稳定性,而且改变了边坡的破坏模式,即增大了边坡发生滑动面的范围。同时,本文方法

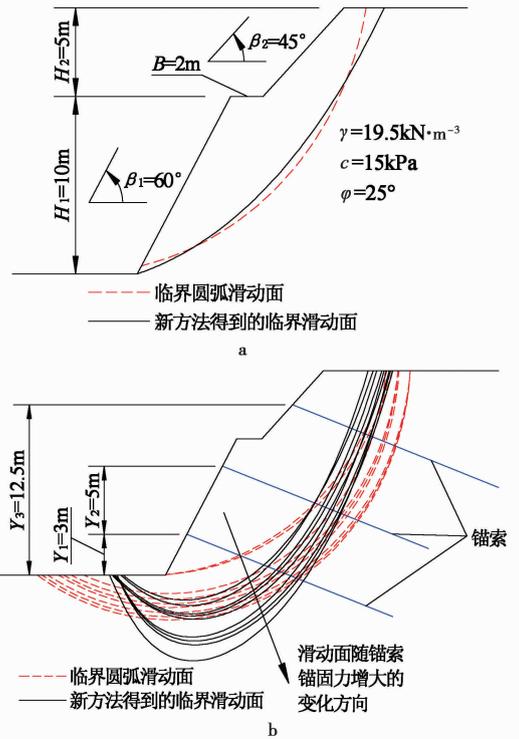


图8 二级边坡临界滑动面

Fig. 8 The critical sliding surface of a two-step slope  
a. 未加固边坡; b. 锚索加固边坡

得到的临界滑动面与临界圆弧滑动面基本一致,但呈非圆弧形。

#### 3.3.2 三维稳定性分析

取边坡外形、土层参数和锚索加固位置与3.2.1节算例相同。为研究锚索加固边坡的三维空间效应,取锚索倾角  $\theta = 20^\circ$ ,锚固力  $F = 200\text{kN}$ ,滑动体长度  $L/2 = 15\text{m}$ 。当锚索水平加固间距  $S$  变化时三维边坡计算得的最小安全系数见图9,得到的临界滑动面如图10所示。

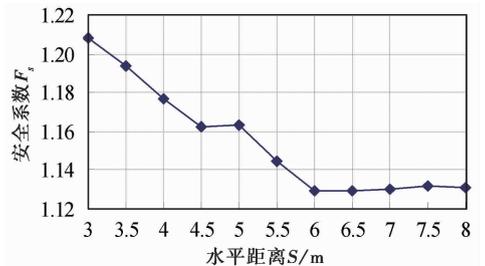


图9 不同锚索水平间距时加固边坡的安全系数对比

Fig. 9 Contrast of FOS in slope reinforced with pre-tensioned cables in different horizontal spacing of reinforcement cables

从图10中可知:随着锚索水平加固间距  $S$  的逐

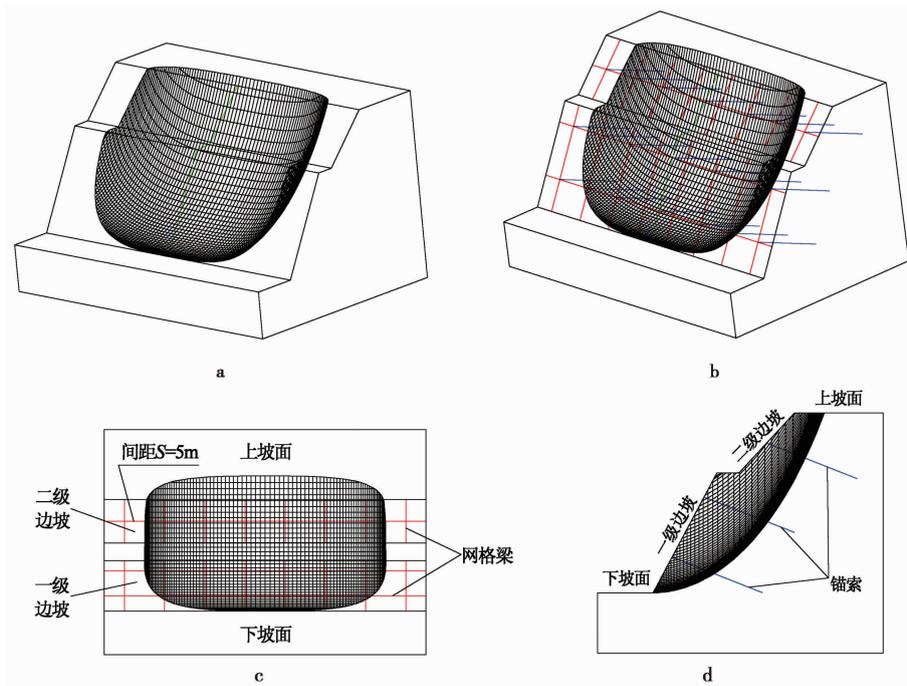


图 10 未加固边坡与锚索加固二级边坡的三维滑动面

Fig. 10 Three-dimensional sliding surface of in general two-step slope and two-step slope reinforced with pre-tensioned cables

a. 未加固边坡立体图( $S=5\text{m}$ ); b. 锚索加固边坡立体图( $S=5\text{m}$ ); c. 锚索加固边坡俯视图( $S=5\text{m}$ ); d. 锚索加固边坡侧面图( $S=5\text{m}$ )

渐增大, 计算得的最小安全系数逐渐减小。其中, 本例中未加固边坡计算得的最小安全系数为 1.068, 因此, 锚索加固边坡相比未加固边坡的稳定性得到了明显的改善。

## 4 结论

基于滑动面搜索新方法, 研究了二维和三维锚索加固条件下的边坡稳定性, 并在一定程度上对锚索倾角  $\theta$ 、三维滑动体长度  $L$ 、锚固力  $F$  和水平加固间距  $S$  变化时对边坡稳定性的影响进行了分析, 可以得出以下结论:

(1) 通过算例对比分析, 表明本文方法计算得的最小安全系数与其他方法相接近, 且相比简化 Bishop 圆弧法和 Janbu 圆弧法要小, 得到的临界滑动面与圆弧滑动面相似, 但表现为非圆弧形, 可说明本文方法的可行性;

(2) 锚索加固边坡比未加固边坡计算得的最小安全系数要大, 因而, 说明锚索可有效地提高边坡的稳定性, 且单位水平加固间距上的锚固力越大对边坡的加固效应越明显。另外, 锚索加固除了增强边坡的稳定性外, 也在一定程度上加大了原有边坡发生滑动的范围;

(3) 随滑动体长度  $L$  的增大, 三维未加固和锚索加固边坡计算得的安全系数曲线趋于平缓, 即三维稳定性趋于二维稳定性。

## 参 考 文 献

- [1] 何本贵, 高谦, 刘芳. 公路路堑边坡稳定性影响因素正交分析与数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 716~719.  
He Bengui, Gao Qian, Liu Fang. Orthogonal analysis and numerical simulation on influential factors of freeway slope stability. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(6): 716~719.
- [2] 高伟东. 加锚边坡的稳定性分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.  
Gao Weidong. Stability Analysis of the Anchored slope. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [3] 任翔. 加固条件下的边坡稳定性计算及其程序化[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.  
Ren Xiang. Calculation and Programming on Stability of Reinforced Slope. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [4] 李新坡, 何思明, 徐骏, 等. 预应力锚索加固土质边坡的稳定性极限分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2006, 38(5): 82~85.  
Li Xinpo, He Siming, Xu Jun, et al. Stability analysis of slopes reinforced with pre-tensioned cables by limit analysis method. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38(5): 82~85.

- [5] Huang Xianwu, Mao Xianbiao, Miao Xiexing, et al. Study of slope reinforcement force based on FLAC. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2006, **16**(2): 123 ~ 127.
- [6] 夏雄, 周德培, 肖世国. 预应力锚索加固边坡稳定性的有限元评价[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(增1): 4489 ~ 4492.  
Xia Xiong, Zhou Depei, Xiao Shiguo. Fem stability analysis of slopes reinforced by pre-stressed anchor cable. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(S1): 4489 ~ 4492.
- [7] 高谦, 赵静波, 吴学民. 预应力锚索加固边坡应用及稳定性分析[J]. *矿业工程*, 2004, **2**(3): 9 ~ 12.  
Gao Qian, Zhao Jingbo, Wu Xuemin. The application and stability analysis of pre-stressed anchor rope reinforce slope. *Mining Engineering*, 2004, **2**(3): 9 ~ 12.
- [8] 吴茂明, 阮含婷, 刘鹭. 预应力锚索在岩土边坡工程治理中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2010, **32**(增1): 324 ~ 326.  
Wu Maoming, Ruan Hanting, Liu Lu. Application of pre-stressed anchor cables in treatment of geotechnical slopes. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, **32**(S1): 324 ~ 326.
- [9] 熊保林, 王希良, 路春娇. 高边坡预应力锚索格子梁加固系统三维有限元分析[J]. *铁道建筑*, 2010, **16**(2): 67 ~ 70.  
Xiong Baolin, Wang Xiliang, Lu Chunqiao. Three-dimensional Fem analysis of reinforcement system of anchor lattice beam in high side slope. *Railway Engineering*, 2010, **16**(2): 67 ~ 70.
- [10] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 基于 Janbu 法的边坡整体稳定性滑动面搜索新方法[J]. *岩土力学*, 2011, **32**(3): 891 ~ 898.  
Deng Dongping, Li Liang, Zhao Lianheng. A new method of sliding surface searching for general stability of slope based on Janbu method. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(3): 891 ~ 898.
- [11] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 一种三维均质土坡滑动面搜索的新方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, **29**(增2): 3719 ~ 3727.  
Deng Dongping, Li Liang, Zhao Lianheng. A new method to search sliding surface of three-dimensional slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, **29**(S2): 3719 ~ 3727.
- [12] 李亮, 邓东平, 赵炼恒. 任意滑动面搜索新方法应用于三维复杂土坡稳定性分析[J]. *岩土工程学报*, 2011, **33**(4): 9 ~ 18.  
Li Liang, Deng Dongping, Zhao Lianheng. Application of a new method of arbitrary sliding surface search on stability analysis of the complex three-dimensional slope. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(4): 9 ~ 18.
- [13] 邓东平. 用于三维复杂土坡稳定性分析的滑动面搜索新方法[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
Deng Dongping. A New Method of Searching for Sliding Surface in Analyzing Stability of Three-Dimensional Complex Slopes. Changsha: Central South University, 2010.
- [14] 罗强. 岩质边坡稳定性分析理论与锚固设计优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
Luo Qiang. Stability Study for Rock Slope and Anchoring Parametric Analysis. Changsha: Central South University, 2011.
- [15] 邓东平, 李亮. 基于滑动面搜索新方法对地震作用下边坡稳定性拟静力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, **31**(1): 86 ~ 98.  
Deng Dongping, Li Liang. Based on a new method of searching for sliding surface pseudo-static stability analysis of slope analysis of slope under earthquake. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, **31**(1): 86 ~ 98.
- [16] 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 Shuren, Feng Dingxiang, Ge Xiurun, et al. 3D limit equilibrium method for slope stability and its application. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1999, **21**(6): 657 ~ 661.