

DOI: 10.11779/CJGE201909017

考虑滑体中锚拉力扩散效应的锚固边坡稳定性分析方法

雷 军¹, 肖世国^{*1, 2}

(1. 西南交通大学地质工程系, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学高速铁路线路工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 为充分考虑锚拉力在滑体中的应力扩散效应以更合理地分析锚固边坡稳定性, 将作用在坡面框架上的锚拉力转化为沿坡面法向与切向的局部条形荷载, 基于弹性力学 Boussinesq 解和 Cerruti 解, 得到在滑面处各点的附加法向与切向作用力, 将其引入边坡稳定性分析的极限平衡条分法中, 给出了基于 Morgenstern-Price 法的相关计算公式。实例分析表明, 锚拉力在滑面处产生的附加应力并非都起抗滑作用, 还存在局部促滑作用, 与传统的将锚拉力视为集中力的锚固边坡稳定性计算方法相比, 该方法计算的稳定系数偏小, 且与数值模拟分析结果更为接近。

关键词: 边坡稳定性; 格构锚固结构; 锚拉力; 应力扩散效应; 稳定系数

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)09-1724-07

作者简介: 雷 军(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事边坡稳定性与支挡结构方面的研究。E-mail: 704471172@qq.com。

Stability analysis method for anchored slopes considering stress dispersion effect in sliding mass due to anchor tensile forces

LEI Jun¹, XIAO Shi-guo^{1, 2}

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Key Laboratory of High-Speed Railway Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to reasonably analyze the stability of anchored slopes with consideration of stress dispersion effect in the sliding mass due to anchor tensile forces, the anchor forces on the frameworks on the slope face are transformed into the locally normal and tangential strip loading, and the corresponding dispersed normal and shear stress on the slip surface is obtained using the Boussinesq's and Cerruti's solution of elastic mechanics. On this basis, the additional stress results are introduced into the limit equilibrium slice method for slope stability analysis, and the related formulas based on the Morgenstern-Price method is derived. The analysis results of a practical slope reinforced with prestressed anchor cable framework show that the additional stress on the slip surface does not fully provide resistance for the sliding mass, but a few of them are driving the sliding mass. Compared with that of the traditional analysis method for anchored slope stability in which the anchor tensile forces on the sliding mass are assumed simply as a series of single forces on the slip surface, the factor of safety obtained using the proposed method is smaller, and it is more consistent with that computed by the numerical simulation method.

Key words: slope stability; anchors with framework; anchor tensile force; stress dispersion effect; factor of safety

0 引言

格构锚固结构是广泛用于边坡锚固工程的有效措施之一。锚索(杆)与框架的组合结构在坡体中形成一个由表及里的加固体系^[1]。其中, 锚索(杆)的锚拉力是该结构加固坡体的关键作用要素。以往通常将锚拉力作为集中力引入锚固边坡稳定性分析中^[2], 但实际上, 锚拉力通过设置于坡面的框架挤压坡体, 在坡体内产生附加应力作用。因此, 考虑锚拉力在坡体中的附加应力, 特别是其扩散到滑面时的应力水平, 对锚固边坡稳定性分析更具合理性。王邓峪等^[3]针对预应力锚杆支护的土质边坡估算了预应力引起的附加

应力, 并且基于圆弧滑动面, 采用应力圆的分析方法, 推导了预应力加固边坡的稳定性计算方法, 但该方法对实践中常见的非圆弧滑面并不成立; 贾金青等^[4]基于极限平衡理论, 得到了预应力锚杆作用下基坑稳定的计算公式, 并且通过数值模拟, 认为锚杆的预应力对于基坑的位移及滑移场的影响很大。但其在实际工程设计时无法量化锚杆预应力的影响, 仅作安全储备近似考虑。赵晓彦等^[5]针对于预应力锚索框架, 预应力作用在刚性的框架上, 转化为矩形力的分布模式,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278430)

收稿日期: 2018-11-20

*通讯作者(E-mail: xiaoshiguo@swjtu.edu.cn)

推导了坡体内任意深度的预应力传递系数的计算方法, 分析了其传递规律。但该方法没有考虑到坡体内任意一点由于预应力引起的不同方向的附加应力影响。何思明等^[6]将预应力锚索地梁加固边坡体系离散化处理, 对地梁和梁下地基分别讨论, 地基部分采用弹性力学的 Boussinesq 应力解, 给出了预应力锚索地梁的计算分析方法, 但并未涉及加固边坡的稳定性问题。

综合而言, 因缺乏考虑锚索(杆)的锚拉力在坡体中的应力扩散效应, 在锚固边坡稳定性分析中, 采用将锚拉力视为集中力直接作用在滑面上的方法, 与实际的格构锚固结构加固边坡的作用机理存在差异。因此, 本文从这一问题出发, 着重探讨锚索(杆)的锚拉力在坡体中应力扩散规律, 推导任意形状滑面处的附加法向与切向作用力的计算表达式。在此基础上, 根据 Morgenstern-Price 法^[7]与传递系数法^[8], 给出考虑滑体中锚拉力扩散效应的锚固边坡稳定性分析方法。

1 分析模型与附加应力计算方法

1.1 模型建立

如图 1(a)所示的格构锚固结构加固边坡的一般位置关系。每一锚索(杆)框架的作用范围可取为相邻两列锚索(杆)“中一中”间距的范围, 如图 1(b)所示。为简化分析, 这里将锚索(杆)作用在框架上的集中力转换为均布条形荷载 p , 且近似认为坡体在 y 方向(坡面方向)无限长, 所分析的问题视为平面应变问题。

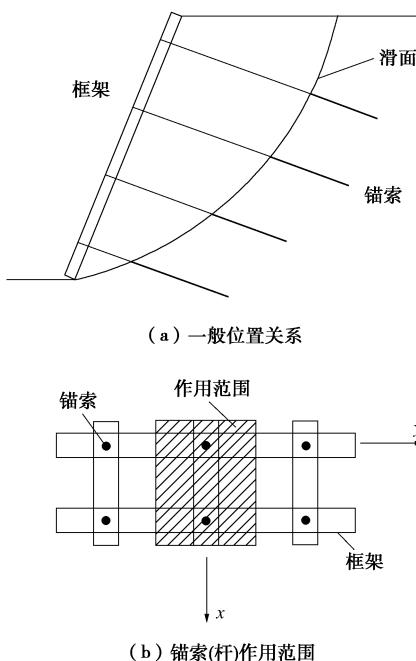


图 1 格构锚固结构加固边坡分析模型

Fig. 1 Analysis model for a slope reinforced by anchors with framework

这样, 采用条分法进行锚固边坡稳定性分析时, 可先将锚拉力分解为垂直与平行于坡面的均布条形荷载, 再根据弹性理论得出滑面处的附加应力, 从而对每一条块相应滑面范围内法向与切向附加应力积分即为该条块滑面上的附加法向与切向力(见图 2), 进而将其引入条分法计算公式中即可分析边坡稳定性。

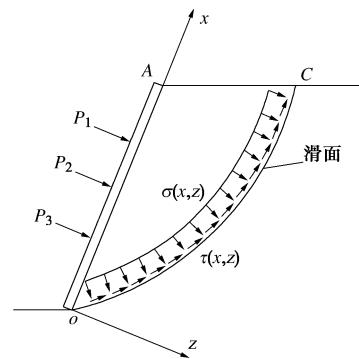


图 2 锚拉力扩散效应示意图

Fig. 2 Sketch map of stress dispersion effect due to anchor tensile forces

1.2 坡面法向条形荷载作用下附加应力

根据弹性半空间体在边界上受法向集中力作用的 Boussinesq 解^[9], 将其在 y 方向无限长范围内积分, 可以得到 Flamant 解^[10]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{2x^2 z p q}{\pi(x^2 + z^2)^2}, \\ \sigma_z &= \frac{2z^3 p q}{\pi(x^2 + z^2)^2}, \\ \tau_{xz} &= \frac{2x z^2 p q}{\pi(x^2 + z^2)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 q 为法向均布线荷载; σ_x , σ_z 分别为 x , z 向正应力, τ_{xz} 为剪应力; x , y , z 为坡体中任意点坐标。

从而, 对于图 3 所示的分布范围为 b 的条形荷载作用下无限长坡体, 对式(1)在条形荷载分布宽度 b 内积分, 可得坡面法向均布条形荷载 p 作用下坡体中附加应力计算表达式:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \int_0^b \frac{2(x-\eta)^2 z p d\eta}{\pi[(x-\eta)^2 + z^2]^2}, \\ \sigma_z &= \int_0^b \frac{2z^3 p d\eta}{\pi[(x-\eta)^2 + z^2]^2}, \\ \tau_{xz} &= \int_0^b \frac{2(x-\eta)z^2 p d\eta}{\pi[(x-\eta)^2 + z^2]^2}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

1.3 水平向荷载作用下应力计算

在坡面切向集中力作用下坡体内的附加应力场可由弹性力学 Cerruti 公式^[11]得到:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{Qx}{2\pi R^3} \left[\frac{3x^2}{R^2} - \frac{1-2\nu}{(R+z)^2} \left(R^2 - y^2 - \frac{2Ry^2}{R+z} \right) \right], \\ \sigma_z &= \frac{3Qxz^2}{2\pi R^5}, \\ \tau_{xz} &= \frac{3Qx^2z}{2\pi R^5}, \\ R &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 Q 为切向集中力; ν 为材料泊松比; R 为计算点到坡面集中力作用点距离。

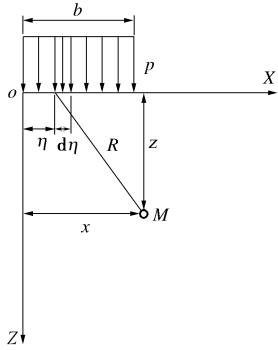


图 3 半无限体表面均布条形荷载作用分析模型

Fig. 3 Analysis model for stress caused by uniform strip loading on surface of a semi-infinite elastic body

同理, 在坡面切向条形均布荷载作用下, 采用沿其分布宽度 b 积分的方法, 可得坡体中附加应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \int_0^b \frac{2p_1(x-\eta)^3 d\eta}{\pi[(x-\eta)^2 + z^2]^2}, \\ \sigma_z &= \int_0^b \frac{2p_1(x-\eta)z^2 d\eta}{\pi[(x-\eta)^2 + z^2]^2}, \\ \tau_{xz} &= \int_0^b \frac{2p_1(x-\eta)^2 z d\eta}{\pi[(x-\eta)^2 + z^2]^2}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, p_1 为坡面切向条形均布荷载。

1.4 滑面应力状态分析

在平面应变问题中, 锚索锚拉力在滑面处产生附加应力 σ_x , σ_z 和 τ_{xz} , 在滑面处任取一单元体, 如图 4 所示。根据材料力学, 沿滑面方向的附加正应力 σ_ω 与剪应力 τ_ω 为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_\omega &= \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \cos 2\omega + \tau_{xz} \sin 2\omega, \\ \tau_\omega &= \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \sin 2\omega + \tau_{xz} \cos 2\omega, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, ω 为滑面切向与 x 轴的夹角。

2 稳定性分析方法

实践中, 计算边坡稳定性的方法多以极限平衡条

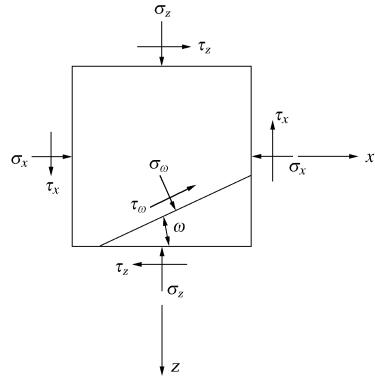


图 4 滑面单元应力分析模型

Fig. 4 Analysis model for stress on an element of slip surface

分法为主, 包括 Morgenstern-Price 法^[12]、Spencer 法^[13]、严格 Janbu 法^[14]、Bishop 法^[15]及传递系数法^[8]等。其中 Morgenstern-Price 法和 Spencer 法是严格条分法, 而传递系数法又在中国工程实际中被广泛采用。因此, 本文主要基于这 3 种方法, 在分析中引入滑面处的附加应力。限于篇幅, 下面以 Morgenstern-Price 法^[7]为例, 给出具体分析计算公式。

如图 5 所示第 i 个条块受力分析, W_i 为条块自重; $K_c W_i$ 为条块水平地震力, K_c 为水平地震惯性力影响系数; N_i 为滑面法向反力, S_i 为抗力; E_i , E_{i-1} 为水平条间力, X_i , X_{i-1} 为竖直条间力; z_i , z_{i-1} 为水平条间力到滑面的垂直距离; σ_i , τ_i 为锚索拉力在滑面位置处引起的附加应力; b_i 为条块宽度, h_i 为条块高度, β_i 为坡面倾角, α_i 为滑面倾角。根据静力平衡条件, 有

$$\begin{aligned} N_i + (E_{i-1} - E_i) \sin \alpha_i - (X_{i-1} - X_i) \cos \alpha_i - \\ W_i \cos \alpha_i + K_c W_i \sin \alpha_i - N_{\sigma_i} = 0 \quad , \quad (6) \\ S_i - (E_{i-1} - E_i) \cos \alpha_i - (X_{i-1} - X_i) \sin \alpha_i - \\ K_c W_i \cos \alpha_i - W_i \sin \alpha_i + T_{\tau_i} = 0 \quad , \quad (7) \end{aligned}$$

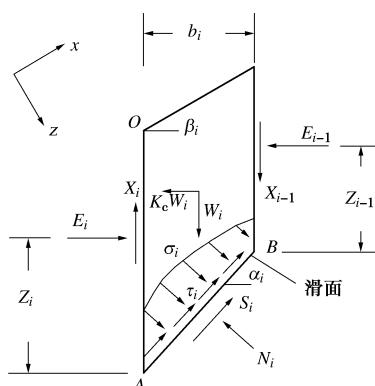


图 5 条块受力分析模型

Fig. 5 Analysis model for a slice of sliding mass

$$X_{i-1} \cdot \frac{b_i}{2} + X_i \cdot \frac{b_i}{2} - E_{i-1} \left(z_{i-1} + \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) + \\ E_i \left(z_i - \frac{b_i}{2} \tan \alpha_i \right) - K_c W_i \frac{h_i}{2} - M_{\sigma_i} = 0 \quad (8)$$

式中 N_{σ_i} 为滑面处附加法向作用力; T_{τ_i} 为滑面处附加切向作用力; M_{σ_i} 为滑面处附加力矩。三者可按式 (9) ~ (11) 求出:

$$N_{\sigma_i} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma_i}{\cos \omega_i} dx \quad , \quad (9)$$

$$T_{\tau_i} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\tau_i}{\cos \omega_i} dx \quad , \quad (10)$$

$$M_{\sigma_i} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{x_1 + x_2 - 2x}{2 \cos \omega_i} \cdot \sigma_i dx \quad , \quad (11)$$

式中, x_1 , x_2 为滑面端点 A, B 的横坐标, ω_i 为滑面切向与 x 轴的夹角。

莫尔-库仑强度破坏准则:

$$S_i = \frac{1}{F_s} (c_i l_i + N_i \tan \varphi_i) = \frac{1}{F_s} \left(\frac{c_i b_i}{\cos \alpha_i} + N_i \tan \varphi_i \right) \quad (12)$$

式中 F_s 为稳定系数; c_i , φ_i 为第 i 条块滑面处的黏聚力和内摩擦角; l_i 为第 i 条块滑面长度。

设条间力函数为 k , 条间的推力 E 与切向力 X 存在关系 $X = \lambda k E$, 所以有

$$X_{i-1} = \lambda k_{i-1} E_{i-1}, \quad X_i = \lambda k_i E_i \quad , \quad (13)$$

式中, λ 为比例系数, 若条间力函数 $k_i = k_{i-1} = 1$, 则为 Spencer 法, 条间力函数也可以采用半正弦函数等^[12]。

联立式 (6), (7), (12), (13), 可得

$$E_i \zeta_i = \kappa_{i-1} E_{i-1} \zeta_{i-1} + F T_i - R_i \quad , \quad (14)$$

式中, $\zeta_i = F_s (\cos \alpha_i + \lambda k_i \sin \alpha_i) + \tan \varphi_i (\sin \alpha_i - \lambda k_i \cos \alpha_i)$, $\kappa_{i-1} = \frac{F_s (\cos \alpha_i + \lambda k_{i-1} \sin \alpha_i) + \tan \varphi_i (\sin \alpha_i - \lambda k_{i-1} \cos \alpha_i)}{\zeta_{i-1}}$,

$$T_i = W_i \sin \alpha_i + K_c W_i \cos \alpha_i - T_{\tau_i}, \quad R_i = \tan \varphi_i \cdot (W_i \cos \alpha_i - K_c W_i \sin \alpha_i + N_{\sigma_i}) + \frac{c_i b_i}{\cos \alpha_i}.$$

将式 (13) 代入式 (8), 经整理可得相应表达式为

$$\lambda k_{i-1} E_{i-1} \frac{b_i}{2} + \lambda k_i E_i \frac{b_i}{2} - K_c W_i \frac{h_i}{2} - E_{i-1} z_{i-1} - \\ \frac{b_i}{2} E_{i-1} \tan \alpha_i + E_i z_i - \frac{b_i}{2} E_i \tan \alpha_i - M_{\sigma_i} = 0 \quad (15)$$

由边界条件 $M_{\sigma_0} = 0$, $M_{\sigma_n} = 0$ 及式 (15) 可推导出

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n [b_i (E_i + E_{i-1}) \tan \alpha_i + K_c W_i h_i + 2 M_{\sigma_i}]}{\sum_{i=1}^n [b_i (k_i E_i + k_{i-1} E_{i-1})]} \quad . \quad (16)$$

从而, 再由边界条件 $E_0 = 0$, $E_n = 0$ 可以推导出坡体稳定系数的表达式为

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \kappa_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \kappa_j) + T_n} \quad . \quad (17)$$

计算时假定初值, 采用简单的迭代法即可求解^[16]。

简言之, 本文所述的锚固边坡稳定性分析的应力扩散方法即为: 采用应力分析方法, 将滑面处各点的附加法向与切向作用力, 引入边坡稳定性分析的极限平衡条分法中。

3 实例验证

如图 6 所示的某道路路堑边坡^[17], 采用预应力锚索地梁进行加固。该路堑共有 3 级坡, 其中第 1, 2 级坡高均为 10 m, 坡率均为 1:0.75, 第 3 级坡高为 8 m, 坡率为 1:1。根据地质勘查, 滑体与滑面主要的物理力学参数如表 1 所示。该路堑边坡加固范围为第 1, 2 级坡, 每级坡均采用 3 束锚索, 锚索倾角 20°, 设计锚拉力为 500 kN, 锚索间距为 5 m。地梁为截面 60 cm×60 cm, 长 12.5 m 的 C30 混凝土梁(钢筋混凝土)。

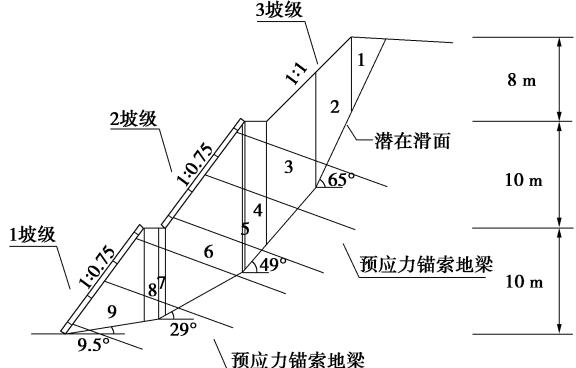


图 6 实例边坡横断面示意图

Fig. 6 Sketch map of cross section of an anchored slope example

表 1 实例坡体主要物理力学参数

Table 1 Main physical and mechanical parameters of slope example

类型	重度 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/(°)	弹性模量 /MPa	泊松 比
滑体	21	25	30	300	0.20
滑面	21	5	20	30	0.20
滑床	23	1000	45	6×10^4	0.25

根据式 (5), 可得到滑面上附加正应力与剪应力如图 7 所示。可见, 锚索拉力在滑面处产生的附加正应力主要集中在锚索直接作用的条块, 并且沿滑面两侧呈现递减的规律; 附加剪应力在锚索作用的条块滑

表 2 实例坡面锚拉荷载产生的滑面处附加作用力

Table 2 Additional forces on slip surface by anchor tensile force on slope face

条块号	坡面法向			坡面切向		
	$N_o/(kN\cdot m^{-1})$	$T_o/(kN\cdot m^{-1})$	$M_o/(kN\cdot m\cdot m^{-1})$	$N_r/(kN\cdot m^{-1})$	$T_r/(kN\cdot m^{-1})$	$M/(kN\cdot m\cdot m^{-1})$
1	76.02	101.47	72.80	52.48	77.69	27.51
2	372.89	204.88	301.79	105.81	89.12	19.37
3	583.27	180.94	154.61	38.39	63.79	-29.31
4	298.49	28.93	0.53	0.31	30.76	-2.25
5	37.42	1.81	-0.01	-0.54	4.12	0.00
6	732.87	145.57	10.39	-95.29	89.93	-25.02
7	66.36	11.64	0.07	-9.81	9.72	-0.02
8	112.48	38.74	0.51	-31.71	11.51	-0.28
9	721.50	182.75	100.37	-275.83	128.96	-151.79

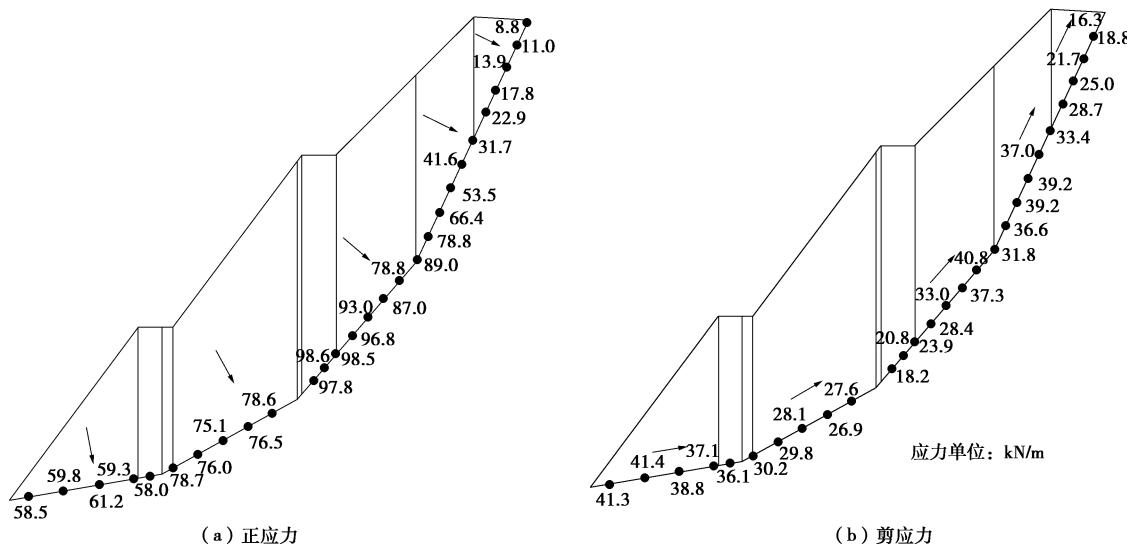


图 7 实例滑面附加应力分布图

Fig. 7 Distribution of additional stress on slip surface in example

面上较小，沿两侧滑面则呈现先增大后减小的规律。按照式(9)~(11)，计算坡锚拉力在滑面处引起的附加法向、切向作用力与力矩，如表2所示。可见，各条块滑面上附加应力并非均为抗滑作用(为正值)。对于坡面法向荷载，在滑面处产生的附加法向力均为正值，最大值出现在条块6处；滑面处的附加切向力均为正值，最大值出现在条块2处；其产生的力矩在条块5处为接近于零，其余为正值。对于坡面切向荷载，滑面处的附加法向力在条块5~9为负值(促滑作用)，最大正值在条块2处，最大负值绝对值在条块9处；滑面处的附加切向力均为正值，最大值在条块9处；其在条块1, 2的力矩为正值，条块5为零，其余则均为负值。

由于分析方法的差异，本文算法与传统方法得到的锚固边坡稳定系数存在一定的差异。表3给出了按照本文算法(应力扩散法)与传统算法(集中力法)^[2]分析锚固边坡稳定系数的结果。可见，本文方法比传

统方法计算结果偏小约5%~9%。其原因在于锚索拉力在滑面处引起的附加应力会出现负值(见表2)，即其在滑面处产生的附加应力并非全部起增大抗滑作用的效果。然而，传统的集中力法却无法反映滑面上这种局部应力作用效果的差异。

表 3 实例边坡稳定系数计算结果

Table 3 Calculated results of factor of safety of slope example

类型	传统方法 (集中力法)	本文方法 (应力扩散法)	相对偏差 /%
Spencer 法	1.798	1.694	-5.78
Morgenstern-Price 法	1.834	1.694	-7.63
传递系数法	1.892	1.724	-8.88

同时，表4给出了Morgenstern-Price法本身与Spencer法、传递系数法的相对偏差。可见，无论是基于传统方法还是本文方法，Morgenstern-Price法计算结果大于Spencer法且小于传递系数法，但与Spencer

法的计算结果更为接近。

为了进一步检验本文方法的合理性，并与传统方法和本文方法一同，进行3种方法之间的相互比较以全面验证，采用FLAC^{3D}数值模拟方法分析了该锚固边坡稳定性，其数值模型见图8，分析结果如图9所示。可见，数值模拟计算的稳定系数为1.67，与本文算法误差为1.4%~3.2%，而与传统算法误差则为7.7%~13.3%。本文算法结果相对更接近数值模拟结果。

表4 Morgenstern-Price法与其余两种方法计算结果相对偏差

Table 4 Relative errors of calculated results between Morgenstern-

Price method and other two methods (%)

类型	传统方法 (集中力法)	本文方法 (应力扩散法)
Spencer法	-1.96	-0.01
传递系数法	3.16	1.77

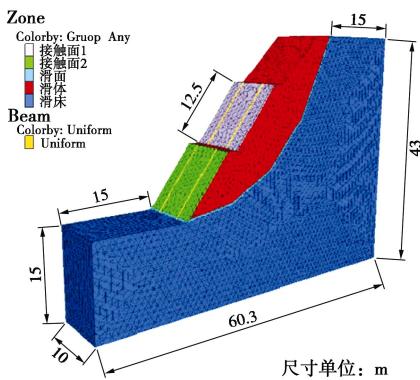


图8 实例 FLAC^{3D} 数值模型

Fig. 8 Numerical model via FLAC^{3D} for example

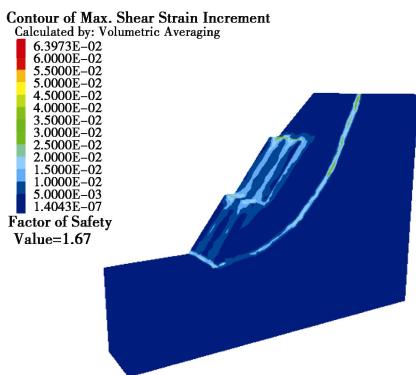


图9 实例 FLAC^{3D} 稳定性计算结果

Fig. 9 Results of stability analysis by FLAC^{3D} for example

4 结 论

本文考虑锚拉力在滑体中的应力扩散效应，对锚固边坡的稳定性进行分析，主要得出以下结论：

(1) 将作用在坡面框架上的锚拉力转化为沿坡

面法向与切向的局部条形荷载，基于弹性力学 Boussinesq 解和 Cerruti 解，采用积分方法，得到在滑面处各点的附加法向与切向作用力。

(2) 锚拉力在滑面处产生的附加应力并非都起抗滑作用，还存在局部的促滑作用。随着距锚拉力作用位置距离的增大，滑面上附加应力呈非线性递减。

(3) 将锚拉力引起的滑面处附加应力引入边坡稳定性极限平衡分析法中，给出了基于 Morgenstern-Price 法的相关计算公式。

(4) 与传统的将锚拉力作为集中力分析锚固边坡稳定性的方法相比，本文方法计算的稳定系数偏小，偏于安全一面。

参 考 文 献：

- [1] 肖世国, 周德培. 岩石高边坡一种预应力锚索框架型地梁的内力计算[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 479~482. (XIAO Shi-guo, ZHOU De-pei. A calculation method for internal force of prestressed anchor-rope and frame beam-on-foundation on high rock slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 479~482. (in Chinese))
- [2] JTGD30—2004 公路路基设计规范[S]. 2004. (JTGD30—2004 Specifications for design of highway subgrade[S]. 2004. (in Chinese))
- [3] 王邓魁, 朱彦鹏. 附加应力法在预应力锚杆支护结构稳定性分析中的应用[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 196~202. (WANG Deng-qun, ZHU Yan-peng. Additional stress apply to analyzing the stability of prestressed anchor support[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(4): 196~202. (in Chinese))
- [4] 贾金青, 郑卫锋. 预应力锚杆柔性支护法的研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1257~1261. (JIA Jin-qing, ZHENG Wei-feng. Study and application of flexible retaining method with prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1257~1261. (in Chinese))
- [5] 赵晓彦, 熊自英. 框架锚固类土质边坡预应力传递规律的研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2146~2152. (ZHAO Xiao-yan, XIONG Zi-ying. Study of transferring mode of prestressed force in frame-anchored soil-like slopes[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 2146~2152. (in Chinese))
- [6] 何思明, 杨雪莲, 周永江. 预应力锚索地梁与地基共同作用分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(1): 83~88. (HE Si-ming, YANG Xue-lian, ZHOU Yong-jiang. Analysis of interaction of prestressed anchor rope foundation beam and

- foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(1): 83 - 88. (in Chinese))
- [7] 朱大勇, 李焯芬, 黄茂松, 等. 对 3 种著名边坡稳定性计算方法的改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(2): 183 - 194. (ZHU Da-yong, LEE C F, HUANG Mao-song, et al. Modifications to three well-known methods of slope stability analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(2): 183 - 194. (in Chinese))
- [8] TB10025—2006 铁路路基支挡结构设计规范[S]. 2014. (TB10025—2006 Code for design on retaining engineering structure of railway subgrade[S]. 2014. (in Chinese))
- [9] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (SHEN Zhu-jiang. Theory of soil mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2000. (in Chinese))
- [10] 袁聚云, 钱建固, 张宏鸣, 等. 土质学与土力学[M]. 4 版. 北京: 人民交通出版社, 2009. (YUAN Ju-yun, QIAN Jian-gu, ZHANG Hong-ming, et al. Soil properties and soil mechanics[M]. 4th ed. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 李元松. 高等岩土力学[M]. 武汉: 武汉大学出版, 2013. (LI Yuan-song. Advanced rock and soil mechanics[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2013. (in Chinese))
- [12] MORGENTERN N R, PRICE V E. The analysis of the stability of general slip surfaces[J]. Géotechnique, 1965, **15**(1): 79 - 93.
- [13] SPENCER E. A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces[J]. Géotechnique, 1967, **17**(1): 11 - 26.
- [14] JANBU N. Slope stability computations[M]// Embankment Dam Engineering, Hirschfield E, ed. New York: John Wiley, 1973: 47 - 86.
- [15] BISHOP A W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes[J]. Géotechnique, 1955, **5**(1): 7 - 17.
- [16] 梁冠亭, 陈昌富, 朱剑锋, 等. 基于 M-P 法的抗滑桩支护边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2015, **36**(2): 451 - 456. (LIANG Guan-ting, CHEN Chang-fu, ZHU Jian-feng, et al. Stability analysis of pile stabilized slope based on Morgenstern-Price method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(2): 451 - 456. (in Chinese))
- [17] 欧 源. 预应力锚索地梁下坡体压力的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009. (OU Yuan. Study on slope pressure on prestressed anchor-cable beam-on-foundation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese))