

# 边坡锚固工程分析中的水平条分法

魏作安<sup>1a,2</sup>, 朱彬<sup>1a,1b</sup>, 万玲<sup>1a,1b</sup>, 周永昆<sup>1a,1b</sup>, 陈宇龙<sup>1b</sup>

(1. 重庆大学 a. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室; b. 资源与环境科学学院, 重庆 400044;  
2. 湖南科技大学 湖南省煤矿安全开采技术重点实验室, 湖南湘潭 411201)

**摘要:** 对目前中国规范推荐用于边坡加固计算的垂直条分传递系数法进行研究, 发现将该方法用于边坡锚固受力分析时, 不仅存在垂直条块与加固结构体(锚杆和锚索)相互交叉, 而且计算得出的锚固力与加固体的实际锚固力存在偏差等缺陷。在相关资料提出的、用于加筋土稳定性分析的水平条分法基础上, 结合边坡锚固工程的特点, 将该水平条分法做进一步拓展, 使其能适用于锚杆和锚索等边坡锚固工程的稳定性计算, 并通过工程实例对拓展后的水平条分法进行了验证。

**关键词:** 水平条分法; 边坡加固; 锚杆; 极限平衡法; 土力学

**中图分类号:** TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)03-0053-04

## Horizontal Slice Method for the Stability Analysis of Reinforced Slopes

WEI Zuo-an<sup>1a,2</sup>, ZHU Bin<sup>1a,1b</sup>, WAN Ling<sup>1a,1b</sup>, ZHOU Yong-kun<sup>1a,1b</sup>, CHEN Yu-long<sup>1b</sup>

(1a. The Key Laboratory of the Exploitation of Southwest Resources & the Environmental Hazards Control Engineering,  
1b. College of Resource and Environmental Sciences Ministry of Education, Chongqing University,  
Chongqing 400044, P. R. China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines,  
Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, P. R. China)

**Abstract:** Relevant national codes usually require the transmitting coefficient method to be employed for the stability analysis of slope reinforcement, in which sliding mass is usually divided into a number of vertical slices. For some support technologies, such as rock bolting and anchor cable, the intersections between the slices and the anchor-bar, and the forces mobilized in the reinforcements are different from the assumptions in this method. Thus the transmitting coefficient method confronts some difficulties during practical applications, which would influence the project quality of reinforcements. A new Horizontal Slice Method was proposed based on the overseas relevant literatures to overcome these difficulties in the stability analysis of rock bolting and anchor cable slopes.

**Key words:** horizontal slice method, slope reinforcement, rock-bolts, limit equilibrium method, soil mechanics

极限平衡法是通用的一种用于边坡稳定性分析的计算方法<sup>[1-5]</sup>。中国相关资料和规范要求采用极限平衡法中的垂直条分传递系数法进行边坡加固的

受力分析<sup>[6-7]</sup>。然而垂直条分传递系数法在分析锚杆和锚索加固边坡时, 垂直划分的条块会与加固结构体锚杆等存在交叉, 同时, 锚杆提供的加固力的作

收稿日期: 2009-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772205); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2007BB0136); 中国博士后科学基金资助项目(20070420123); 高等学校博士学科点专项科研基金(200806110012); 湖南省煤矿安全开采技术重点实验室开放基金资助项目(200806)

作者简介: 魏作安(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事金属矿开采、尾矿库、滑坡灾害研究与防治等研究, (E-mail) weiza@cqu.edu.cn.

用点在坡面上,而资料和规范中提出的锚杆的作用力的作用点是滑面处,这些与实际情况存在偏差,使得该方法在应用中存在一些缺陷,势必影响边坡加固工程的效果。为此,在相关资料提出的用于加筋土坡稳定性计算的条分法基础上<sup>[8-10]</sup>,将水平条分法进行了拓展,使其能更好地适应用锚杆和锚索等边坡加固措施的分析与计算。

## 1 垂直条分传递系数法的缺陷分析

在边坡稳定性计算分析中,通过分析地质资料或边坡稳定计算,确定边坡潜在的最危险滑面位置

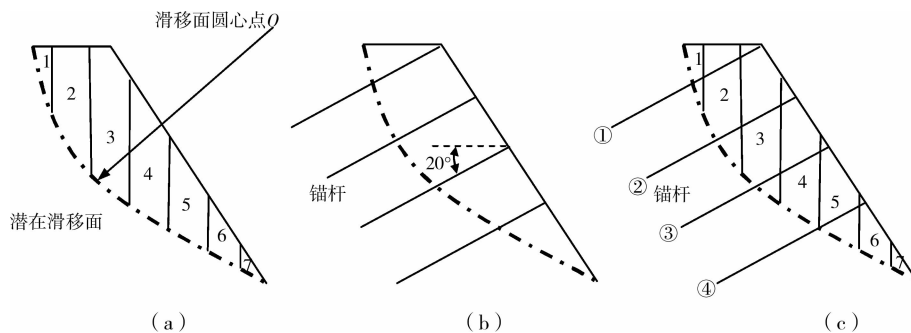


图 1 边坡锚固分析示意图

采用垂直条分传递系数法的条块受力分析如图 2 所示,图中,  $E_{i-1}$  为第  $i-1$  块滑体下滑力,  $E_i$  为第  $i$  块滑体下滑力,  $W_i$  为第  $i$  块滑体重量,  $\alpha_i$  为第  $i$  块滑体滑面的倾角,  $T_i$  为锚杆作用在第  $i$  块滑体的加固力,  $\beta$  为锚杆与水平面的夹角,  $N_i$  为滑面上正压力,  $S_i$  为滑面的抗滑力。

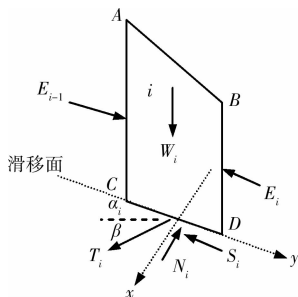


图 2 条块受力分析简图

从受力分析图中可以看出,假定锚杆或锚索的作用力  $T_i$  是在滑面上(图 2 中 CD 边)<sup>[11]</sup>。从锚杆作用原理可以知道(如图 3),锚杆是通过位于滑床稳定岩土层中的锚固段 EF 和坡面锚头 O 产生锚固力的。从力的 3 要素(大小,方向和作用点)可以知道,锚杆作用在滑体上的锚固力  $T_i$  的作用点是坡面(AB 边)上 O 点处,而非滑移面处。而且许多研究成果亦表明锚固力的传递深度远不能到达滑移面

(如图 1(a))。然后按照设计规范对边坡进行加固初步设计,布置锚杆或锚索等加固工程(如图 1(b))。最后采用垂直条分传递系数法对锚杆锚索等加固工程的参数进行计算(如图 1(c))。

从图 1(c)中可以看出,如果为了提高分析的精度,可将条块划分较细,这样一根锚杆或锚索会与多个条块相交,即出现加固体与条块交叉的现象。一旦出现交叉,那么如何将这根锚杆的作用力分配到多个条块上就非常困难,从而影响到计算结果的可靠性与准确性。

处<sup>[12]</sup>。所以,将锚固力移至滑移面处会使计算结果与实际情况产生偏差,亦会给边坡加固工程造成不利影响。

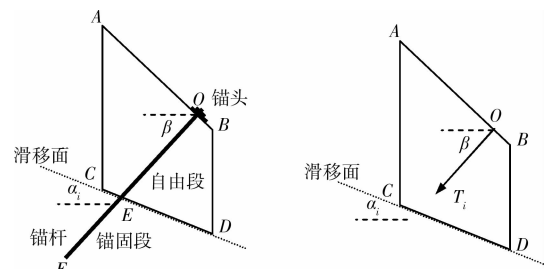


图 3 锚杆作用力分析简图

## 2 边坡锚固工程中的水平条分法

### 2.1 水平条分法原理

水平条分法(HSM)最早是由 Lo 和 Xu<sup>[8]</sup>于 1992 年提出来的。后来 Shhgholi 等人<sup>[9]</sup>对该方法进行了发展与改进,并将该方法应用于加筋土挡土墙地震作用下的稳定性分析。Nour 等人<sup>[10]</sup>对该方法进行了详细推导与完善。水平条分法主要是应用于加筋土挡土墙的稳定性分析与计算,水平条分法(HSM)的条块受力分析如图 4。图中,  $V_i$ 、 $V_{i+1}$  分别为第  $i-1$  和  $i+1$  条块作用在第  $i$  条块的垂直作

用力(相当上覆土层的重量),  $H_i$ 、 $H_{i+1}$  为第  $i-1$  和  $i+1$  条块作用在第  $i$  条块上的水平剪切力,  $W_i$  为第  $i$  块滑体重量,  $\alpha_i$  为第  $i$  块滑体滑面的倾角,  $T'_i$  为加筋材料提供给第  $i$  块的加固力,  $N_i$  为滑面上正应力,  $S_i$  为滑面的抗滑力,  $k_v$ 、 $k_h$  分别为水平和垂直方向的地震力作用系数。

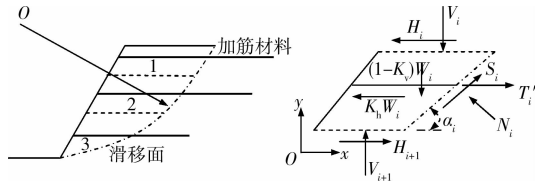


图 4 水平条分法及条块受力分析简图

根据极限平衡原理,每个条块上的水平方向和垂直方向上的作用力平衡,即,

$$\sum F_y = 0 \text{ (每一条块的)} \quad (1)$$

$$\sum F_x = 0 \text{ (整个滑体的)} \quad (2)$$

如果是圆弧型滑面,则条块的力矩亦要平衡,即有,

$$\sum M_o = 0 \text{ (整个滑体的)} \quad (3)$$

通过建立受力平衡方程(式(1)和(2))与力矩(式(3)),则可以求解出地震作用下需加筋材料提供的加固力  $T'_i$ 。

如图 5,边坡锚固工程作用在条块上的力  $T_i$  与加筋材料的作用力  $T'_i$  不同,前者与水平方向有个夹角  $\beta$ 。为此,将  $T_i$  分解成水平方向和垂直方向的 2 个分力,即

$$\begin{cases} T_i^x = T_i \cos\beta \\ T_i^y = T_i \sin\beta \end{cases} \quad (4)$$

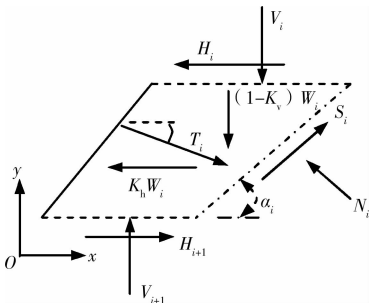


图 5 锚杆加固边坡水平条分法条块受力分析简图

将式(4)代入式(1)和(2)中,垂直方向的力按每个条块考虑平衡,水平方向的力则按整个滑体考虑平衡,这样可以消除条块间的水平剪切力,可以得到滑体在  $x$  与  $y$  方向上的受力平衡方程,即为:

$$\sum F_y = V_{i+1} - V_i - (1 - k_v)W_i + S_i \sin\alpha_i + N_i \cos\alpha_i - T_i \sin\beta = 0 \text{ (每一条块的)} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum F_x = \sum_{i=1}^n (\sum T_i \cos\beta + \sum S_i \cos\alpha_i - \sum N_i \sin\alpha_i - \sum W_i k_h) = 0 \text{ (整个滑体的)} \quad (6)$$

因此,按照常规的传递系数法计算步骤,由坡顶往坡脚逐个条块进行计算,这样可以求出各条块上的锚杆加固力  $T_i$  等参数值。如果滑面为圆弧型,则同样可以考虑力矩平衡。

## 2.2 水平条分法在边坡锚固工程中的应用

伊朗北方高速公路公司计划在德黑兰(Tehran)到查路斯(Chalus)之间修建一条高速公路,以改善 2 个城市之间的交通条件。高速公路在 K13+200 处有一个人工开挖、高度为 50.0 m 的土质边坡(如图 6)。由于边坡比较高,而且又是土质边坡,同时设计的边坡又陡(伊朗公路设计公司设计的坡度为 3:2),边坡开挖到第 3 级台阶时发生了局部垮塌(图 7),所以,必须对该边坡进行加固处理。

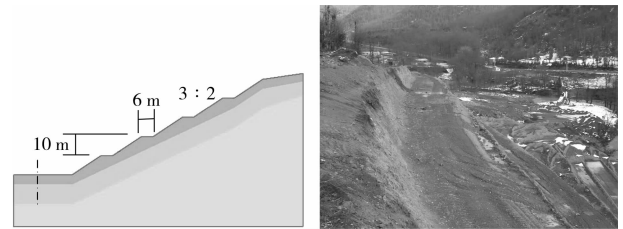


图 6 设计的边坡以及部分开挖后的情况



图 7 边坡上的局部垮塌

在综合计算分析后,结合中国经验,设计采用框架梁+锚杆为主的加固方案(如图 8),其中锚杆的长度为 12.0 m,间距为 2.0 m,采用  $\Phi 32$ 、S400 钢筋(伊朗当地钢材)。在锚杆受力分析中,按照水平条分法进行了计算。为了与垂直条分法进行比较,采用余推力法进行了加固计算,2 种方法的计算模型如图 9,条块的初始数据见表 1。按照倾角  $20^\circ$  施加  $16.83 \text{ kN/m}^2$  的锚杆作用力后,水平条分法计算得到的边坡稳定系数为 1.30,而垂直条分法计算得到的边坡稳定系数为 1.21。说明边坡达到相同的稳定系数,采用水平条分法计算施加的作用力比垂直条分法要小,要经济。

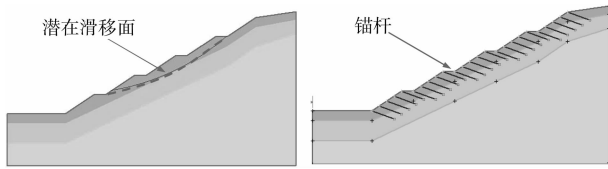
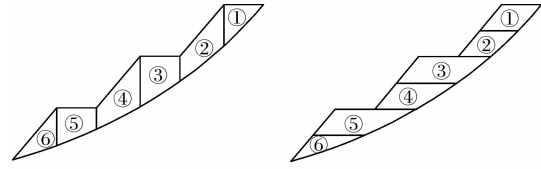


图 8 稳定计算与加固方案



(a) 垂直条分

(b) 水平条分

图 9 两种条分法条块划分示意图

表 1 2 种条分法各条块初始数据

条块 编号	垂直条分			水平条分			滑面强度参数		
	重量/ kN	滑面斜 长/m	滑面倾 角/°	重量/ kN	滑面斜长/ m	滑面倾角/°	滑块中心 线长/m	内摩擦 角/°	粘结力 /kPa
①	476.671	10.01	53.19	584.095	6.13	54.66	5.90	20.5	25.26
②	851.467	9.56	45.76	529.987	6.54	49.85	5.35	20.5	25.26
③	869.305	7.74	39.19	995.559	7.11	44.67	10.05	20.5	25.26
④	917.468	7.97	33.22	769.016	7.95	38.95	7.76	20.5	25.26
⑤	677.249	6.77	27.63	996.946	9.33	32.39	10.06	20.5	25.26
⑥	479.446	7.20	22.33	385.697	12.19	24.22	3.89	20.5	25.26

### 3 结论

1) 经过分析,垂直条分传递系数法在边坡锚固分析中存在一些缺陷,其中包括条块与锚固体之间发生交叉,分析时锚固力作用点的位置与实际情况不同,使计算结果与实际情况会产生出入,影响边坡锚固工程的质量与效果。

2) 将加筋土坡稳定性计算的水平条分法进行拓展,把倾斜的锚固力分解为垂直和水平 2 部分,这样就可以将该方法移植到边坡锚固工程的计算分析中,克服了垂直条分法的缺陷,受力分析与实际情况更吻合。

#### 参考文献:

- [1] DAS BRAJA M. Principle of Geotechnical Engineering [M]. 5th ed. California: Thomson Learning, 2005.
- [2] OZTEKIN B, TOPAL T, KOLAT C. Assessment of degradation and stability of a cut slope in limestone, Ankara-Turkey [J]. Engineering Geology, 2006, 84 (1): 12-30.
- [3] WEI ZUOAN, LI SHIHAI, Wang J G, et al. A dynamic comprehensive method for landslides control [J]. Engineering Geology, 2006, 84: 1-11.
- [4] 华东水利学院土力学教研室. 土工原理与计算: 上、下册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [5] WEI ZUOAN, YIN GUANGZHI, WAN LING, et al. Case history of controlling a landslide at Panluo open-pit mine in China [J]. Environmental Geology, 2008,

54(4):599-709

- [6] 中国地质环境监测院. 长江三峡工程库区滑坡防治工程设计与施工技术规程[M]. 北京: 地质出版社, 2001.
- [7] GB 50330-2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [8] LO S C R, XU D W. A strain based design method for the collapse limit state of reinforced soil walls and slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29 (8): 832-842.
- [9] SHAHGOLI M, FAKHER A, JONES C J F P. Horizontal slice method of analysis [J]. Geotechnique, 2001, 51(10): 881-885.
- [10] NOURI H, FAKHER A, JONES C J F P. Development of horizontal slice method for seismic stability analysis of reinforced slopes and walls [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, 24 (2): 175-187.
- [11] 李春盛. 喷锚网支护法在边坡加固中的应用[J]. 路基工程, 1999(4): 53-55.  
LI CHUN-SHENG. Application of shotcrete, rock bolting and wire mesh for slope reinforcement [J]. Road Foundation Engineering, 1999(4): 53-55.
- [12] 孙学毅. 边坡加固机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2818-2823.  
SUN XUE-YI. Study on mechanism of slope reinforcement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2818-2823.

(编辑 胡英奎)