

# 传递系数法在滑坡治理削坡方案设计中的应用

夏艳华<sup>1</sup>, 白世伟<sup>2</sup>

(1. 安徽理工大学 土木工程系, 安徽 淮南 232001; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 削坡减载设计的关键在于何处削坡使得削坡方案最为经济而又达到预期稳定效果, 在工程实践中, 一般采用不平衡推力法计算滑坡条块的下滑力和剩余下滑力, 依据剪出口剩余下滑力小于或等于 0 这一条件来搜索最优的削坡规模及位置, 一般情况下计算工作量较大。针对此问题, 利用传递系数法思想, 引入剩余抗滑力概念, 逆向计算各条块的剩余抗滑力, 不需进行优化搜索即可根据剩余抗滑力得到最优条件下削坡规模及位置, 概念简单, 计算方便。计算过程概括如下: 根据预期安全系数从最后一个条块出发, 逆向计算各条块的剩余抗滑力, 剩余抗滑力依次在条块间向上传递, 当剩余抗滑力为负值时, 下一轮计算取为 0, 直到算出所有条块的剩余抗滑力, 剩余抗滑力为负值的条块即为应削坡的条块, 条块剩余抗滑力的负值即为应消除的荷载。

**关键词:** 土力学; 削坡; 传递系数法; 逆向计算; 剩余抗滑力

**中图分类号:** TU 43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2008)增 1 - 3281 - 05

## APPLICATION OF TRANSFER COEFFICIENT METHOD TO SCHEME DESIGN OF LANDSLIDE TREATMENT WITH SLOPE CUTTING

XIA Yanhua<sup>1</sup>, BAI Shiwei<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

**Abstract:** Slope cutting is a traditional method in landslide treatment. The key issue of slope cutting project is to make it most economical and can maintain stability. In practical engineering, unbalanced thrust force method is used to calculate driving force and residual driving force of slope-sliding blocks, then the optimal dimension and location of slope cutting are searched under the condition that the quantity of the residual driving force of shear outlets of landslide is less than or equal to zero, but its computation is considerably tedious. In allusion to the problem, using the idea of transfer coefficient method, the concept of residual sliding resistance force is introduced and optimal dimension and location of slope cutting can be obtained only after residual sliding resistance force of slope-sliding blocks is calculated. This method doesn't need to carry out searching calculation. It is simple and convenient in calculation. The calculation process is as follows: based on the anticipated factor of safety, residual sliding resistance force is calculated inversely starting from the last slide block. The residual sliding resistance force is transferred upwards one by one between the blocks. When the residual sliding resistance force of a block is negative, let it be zero in the next calculation until residual sliding resistance forces of all blocks are achieved. If the residual sliding resistance force of some block is negative, the block is the one that needs to be removed and the quantity of the negative force is the load of the block which needs to be eliminated.

**Key words:** soil mechanics; slope cutting; transfer coefficient method; inverse calculation; residual sliding-

**收稿日期:** 2007 - 03 - 20; **修回日期:** 2007 - 07 - 20

**作者简介:** 夏艳华(1974 -), 男, 博士, 1998年毕业于武汉城市建设学院建筑工程专业, 主要从事岩土工程可视化及计算方面的研究工作。E-mail: xxyyh4321@163.com

resistance force

# 1 引言

削坡减载是治理滑坡常用的方法之一<sup>[1~3]</sup>, 常用于治理处于“头重脚轻”状态而在前方又没有可靠抗滑地段的滑体。在工程实践中, 一般采用不平衡推力法进行削坡减载设计, 基本步骤<sup>[4]</sup>如下: (1) 确定潜在滑动面及滑体、滑面的物理力学参数, 地下水位; (2) 确定安全系数; (3) 对滑体分条并用传递系数法计算每个条块的下滑力、剩余下滑力; (4) 根据步骤(3)的计算结果确定减重的部位和数量。

为了得到经济合理的削坡方案, 在利用不平衡推力法进行削坡减载设计时, 一般依据剪出口剩余下滑力小于或等于 0 这一条件来搜索最优的削坡规模及位置<sup>[5]</sup>; 或引入优化理论, 将削坡方案的选择等价于一个有约束的优化问题, 求解得到最优的削坡方案<sup>[6]</sup>。但这些方法计算量通常较大, 而且优化理论存在很多问题, 如理论复杂、难以掌握及在滑坡满足预期稳定系数而后缘滑块存在剩余下滑推力的情况下<sup>[7]</sup>约束条件不成立等。另一种处理方法是直接使每条滑块的剩余下滑力等于 0, 这样处理不需要进行优化搜索, 计算简单, 但过于保守<sup>[8]</sup>。

针对此问题, 利用传递系数法思想, 引入剩余抗滑力概念, 根据预期安全系数从最后一个条块出发, 逆向计算各条块的剩余抗滑力, 剩余抗滑力依次在条块间向上传递, 当剩余抗滑力为负值时, 下一轮计算取为 0, 直到算出所有条块的剩余抗滑力, 剩余抗滑力为负值的条块即为应削坡的条块, 条块剩余抗滑力的负值即为应消除的荷载。该法不需进行优化搜索即可根据剩余抗滑力得到最优的削坡规模及位置, 概念简单, 计算方便。

## 2 传递系数法

### 2.1 传递系数法的假设

在滑坡治理中, 传递系数法是计算折线滑面或组合滑面滑坡剩余下滑力和稳定性的常用方法, 在相关规范中也明确规定将其作为折线形滑坡稳定性分析和滑坡推力计算的方法, 传递系数法在我国水利、交通和铁道部门滑坡稳定分析中得到了广泛的应用<sup>[9~12]</sup>。

传递系数法属刚体极限平衡分析法, 计算方法

基于如下 6 点假设<sup>[13]</sup>:

- (1) 将滑坡稳定性问题视为平面应变问题;
- (2) 滑动力以平行于滑动面的剪应力和垂直于滑动面的正应力集中作用于滑动面上;
- (3) 视滑坡体为理想刚塑性材料, 认为整个加载过程中, 滑坡体不会发生任何变形, 一旦沿滑动面剪应力达到其剪切强度, 则滑坡体开始沿滑动面产生剪切变形;
- (4) 滑动面的破坏服从莫尔 - 库仑破坏准则;
- (5) 剩余下滑力方向与滑动面倾角一致, 剩余下滑力为负值时则传递的剩余下滑力为 0;
- (6) 沿整个滑动面满足静力的平衡条件, 但不满足力矩平衡条件。

按稳定系数寻求方法及静力平衡条件的差异, 可将目前广泛应用的传递系数法分为两类, 即强度储备法和超载法<sup>[13~15]</sup>。

### 2.2 两种方法的传递系数法计算公式

#### (1) 强度储备法

强度储备法是在选定安全系数  $K$  后, 将极限状态时的抗剪强度指标  $c$ ,  $\tan \varphi$  除以  $K$ , 即令强度指标具有一定的安全储备, 再计算各条块的剩余下滑力。如图 1 所示, 第  $i$  条块的剩余下滑力计算公式如下:

$$E_i = T_i - \frac{R_i}{K} + E_{i-1}\psi_{i-1} \quad (1)$$

其中,

$$R_i = W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i$$

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i / K$$

$$T_i = W_i \sin \alpha_i$$

式中:  $E_i$  为第  $i$  条块的剩余下滑力,  $T_i$  为第  $i$  条块的下滑力,  $R_i$  为第  $i$  条块的抗滑力,  $\psi_{i-1}$  为传递系数, 其他符号意义见图 1。

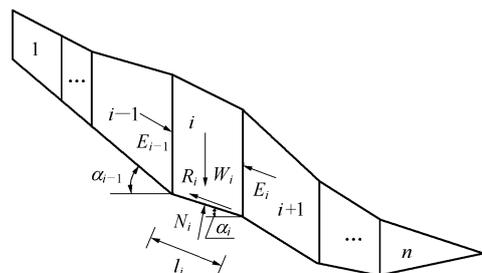


图 1 滑坡剩余下滑力计算图

Fig.1 Calculation sketch of the residual sliding driving force of a landslide

当  $E_i \leq 0$  时, 令  $E_i = 0$ , 此时有

$$E_{i+1} = T_{i+1} - R_{i+1} / K \quad (2)$$

(2) 超载法

超载法是在选定安全系数  $K$  后, 将下滑力乘以  $K$ , 再减去抗滑力作为条块的剩余下滑力, 第  $i$  条块的剩余下滑力计算公式如下:

$$E_i = KT_i - R_i + E_{i-1}\psi_{i-1} \quad (3)$$

其中,

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \tan \varphi_i$$

同样, 当  $E_i \leq 0$  时, 令  $E_i = 0$ , 此时有

$$E_{i+1} = KT_{i+1} - R_{i+1} \quad (4)$$

显然, 两种方法的传递系数等表达式存在一些异同。

### 3 削坡方案优化设计

#### 3.1 剩余抗滑力逆向求解

借鉴传递系数法的思想, 引入一个类似于剩余下滑力的概念——剩余抗滑力, 剩余抗滑力即为逆向求解中各个条块的富余强度储备, 其方向与滑动面倾角一致, 剩余抗滑力为负值时则传递的剩余抗滑力为零。显然, 在条块接触面上, 剩余抗滑力方向与剩余下滑力不在同一直线上, 其夹角大小为两相邻条块倾角之和的补角。

逆向求解的思路如下: 条块的编号如图 2 所示, 在给定安全系数  $K$  的条件下, 从最后一个条块  $n$  开始, 逆向计算各个条块剩余抗滑力, 并将下一条块的剩余抗滑力向上一条块的滑动面逐块投影, 剩余抗滑力为负值时则传递的剩余抗滑力为 0, 直到计

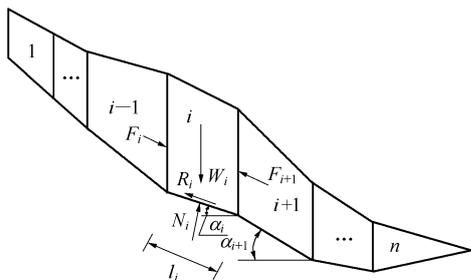


图 2 滑坡剩余抗滑力计算图

Fig.2 Calculation sketch of the residual sliding resistance force of a landslide

算出所有条块的剩余抗滑力, 剩余抗滑力为负值的条块即为需减载的条块, 而剩余抗滑力的负值即为应减载的数量。

(1) 强度储备法计算第  $i$  条块的剩余抗滑力  $F_i$ :

$$F_{i+1} \cos(\alpha_{i+1} - \alpha_i) + S_i = W_i \sin \alpha_i + F_i \quad (5)$$

$$N_i = W_i \cos \alpha_i + F_{i+1} \sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i) \quad (6)$$

$$S_i = \frac{c_i l_i + N_i \tan \varphi_i}{K} \quad (7)$$

由式(5)~(7)可得

$$F_i = F_{i+1}\psi_{i+1} + \frac{c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i}{K} - W_i \sin \alpha_i \quad (8)$$

其中,

$$\psi_{i+1} = \cos(\alpha_{i+1} - \alpha_i) - \frac{\sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i)}{K} \tan \varphi_i$$

当  $F_{i+1} \leq 0$  时, 令  $F_{i+1} = 0$ , 此时

$$F_i = \frac{c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i}{K} - W_i \sin \alpha_i \quad (9)$$

(2) 超载法计算第  $i$  条块的剩余抗滑力  $F_i$ :

$$F_i = F_{i+1}\psi_{i+1} + c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i - KW_i \sin \alpha_i \quad (10)$$

其中,

$$\psi_{i+1} = \cos(\alpha_{i+1} - \alpha_i) - \sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i) \tan \varphi_i$$

当  $F_{i+1} \leq 0$  时, 令  $F_{i+1} = 0$ , 此时

$$F_i = c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i - KW_i \sin \alpha_i \quad (11)$$

相对不平衡推力法, 该法不需进行优化搜索即可得到优化的削坡规模及位置。在不考虑条块间拉应力的条件下(不平衡推力法不考虑条块间的拉应力), 第  $i$  条块的超载部分必然传递给下面的条块, 即超载部分需由下面的条块来抵抗。采用逆向思维, 引入剩余抗滑力的概念进行逆向计算, 就可得到下面条块所能提供的抗力, 如果抗力大于或等于第  $i$  条块的超载部分, 则第  $i$  条块处于稳定状态, 否则需要减载。具体来说, 如果第  $i$  条块的剩余抗滑力小于 0, 说明第  $i, i+1, i+2, \dots, n$  条块的整体抗滑能力不足; 若第  $i$  条块的剩余抗滑力小于零, 而  $i+1, i+2, \dots, n$  条块的剩余抗滑力均大于或等于 0, 说明这个不足正是由第  $i$  条块的载荷所导致。因此在保证  $i+1, i+2, \dots, n$  条块的剩余抗滑力大于或等于 0 的前提下, 只要将第  $i$  条块多于

载荷消除，即可以保证  $i, i+1, \dots, n$  条块的稳定。

### 3.2 削坡优化方案

根据上述逆向求解的思路，削坡减载设计步骤如下：

(1) 确定潜在滑动面及滑体、滑面的物理力学参数，地下水位等。

(2) 确定安全系数  $K$ 。

(3) 对滑体分条并用式(8)，(9)或式(10)，(11)从第  $n$  个条块起，逆向计算每个条块的剩余抗滑力。

(4) 根据步骤(3)的计算结果确定减重的部位和数量：若某条块的剩余抗滑力为负值，这个条块即为需要减重的条块，剩余抗滑力的负值即为应减重的数量。

## 4 算例

以王权 and 何晓明<sup>[8]</sup>的研究中 2#滑体 6-6'勘探方案为算例，计算参数见表 1，预期安全系数  $K=1.25$ 。由于刘忠玉等<sup>[6, 8]</sup>均采用超载法求解，为了进行对比，本文逆向求解也采用超载法求解，所得结果对比见表 2。

表 1 计算参数一览表

Table 1 Computational parameters

计算条块编号	滑块体积 $V_i/m^3$	滑块重力 $W_i/kN$	滑面长度 $L_i/m$	滑面倾角 $\alpha_i(^{\circ})$	黏聚力 $c_i/kPa$	内摩擦角 $\varphi_i(^{\circ})$
1	3.728	78.735	6.70	37	15.50	7.40
2	51.640	1 073.357	19.20	40	15.50	7.40
3	7.470	148.802	2.40	40	33.02	12.38
4	59.620	1 195.167	20.00	35	33.02	12.38
5	2.441	49.634	1.80	25	33.02	12.38

表 2 滑体减载重量及比例计算结果表

Table 2 Results of computation on the cutting weight and proportion of sliding masses

计算条块编号	滑块原重力 $W_i/kN$	王权和何晓明 <sup>[8]</sup>		刘忠玉和王勇 <sup>[6]</sup>		本文计算结果		剩余抗滑力 $F_i/kN$
		需减载重力 $W_i/kN$	减载比例 %	需减载重力 $W_i/kN$	减载比例	需减载重力 $W_i/kN$	减载比例	
1	78.74	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	52.787
2	1 073.36	725.50	67.776	579.43	53.98	590.20	54.97	-415.498
3	148.80	24.07	16.178	0.00	0.00	0.00	0.00	42.538
4	1 195.17	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	59.187
5	49.63	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	43.090

从表 2 中可知，逆向求解剩余抗滑力的优化设计方案与刘忠玉和王勇<sup>[6]</sup>中的优化设计方案结果是一致的，这从实例的角度证明此法是可行的。如前所述，在条块接触面上，剩余抗滑力方向与剩余下滑力不在同一直线上，因而计算所得的减载数量与不平衡推力法优化结果有所出入，由于两种方法对力的方向的假设基于同一类型的假设上，因此不能说明哪种方法更为精确。

## 5 结论

(1) 引入剩余抗滑力的概念，剩余抗滑力即为逆向求解中各个条块的富余强度储备，其方向与滑动面倾角一致，剩余抗滑力为负值时则传递的剩余抗滑力为 0。在条块接触面上，剩余抗滑力方向与剩余下滑力不在同一直线上，其夹角大小为两相邻条块倾角之和的补角。

(2) 利用传递系数法思想，逆向计算各条块的剩余抗滑力，不需进行优化搜索即可根据剩余抗滑力得到最优条件下削坡规模及位置，概念简单，计算方便。

(3) 计算所得的减载数量与不平衡推力法优化结果有所出入，这是由于在条块接触面上剩余抗滑力与剩余下滑力方向不一致所致，但是由于两种方法对力的方向的假设基于同一类型的假设上，因此不能说明哪种方法更为精确。

(4) 此法的思想仍为传递系数法，因此适用范围与不平衡推力法相同。

### 参考文献(References):

[1] 刘传正, 李瑞敏, 李铁锋, 等. 三峡库区白衣庵滑坡防治工程研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 48 - 54.(LIU Chuanzheng, LI Ruimin, LI Tiefeng, et al. Study on Baiyi'an landslide control engineering in the Three Gorges Reservoir area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(1): 48 - 54.(in Chinese))

[2] 杨明亮, 袁从华, 骆行文, 等. 高速公路路堑边坡顺层滑坡分析与治理[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(23): 4 383 - 4 389.(YANG Mingliang, YUAN Conghua, LUO Xingwen, et al. Analysis of bedding landslide of cutting slope in an expressway and its treatment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2005, 24(23): 4 383 - 4 389.(in Chinese))
- [3] 魏作安, 李世海, 万 玲, 等. 潘洛铁矿滑坡特征分析及防治[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(11): 118 - 120.(WEI Zuo'an, LI Shihai, WAN Ling, et al. Characteristics analysis and control studying about Panluo iron ore mine landslide[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2005, 28(11): 118 - 120.(in Chinese))
- [4] 赵明阶, 何光春, 王多垠. 边坡工程处治技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 63 - 75.(ZHAO Mingjie, HE Guangchun, WANG Duoyin. Treatment technology of slope engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2003: 63 - 75.(in Chinese))
- [5] 杨 林, 佴 磊, 刘永平. 滑坡稳定性分析及削坡减载在工程中的应用[J]. 森林工程, 2005, 21(4): 24 - 26.(YANG Lin, ER Lei, LIU Yongping. Landslide stability analysis and application of cutting slope and unloading in engineering[J]. Forest Engineering, 2005, 21(4): 24 - 26.(in Chinese))
- [6] 刘忠玉, 王 勇. 优化方法在削坡工程中的应用[J]. 河南科学, 2000, 18(1): 83 - 85.(LIU Zhongyu, WANG Yong. Application of optimality method on slope cutting project[J]. Henan Sciences, 2000, 18(1): 83 - 85.(in Chinese))
- [7] 易朋莹, 唐红梅. 对用传递系数法求滑坡稳定系数的商榷——以万州太白岩中东段欠稳定斜坡为例[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(1): 78 - 80, 89.(YI Pengying, TANG Hongmei. Discussion about calculating the stabilization coefficient through transferring coefficient method—Wanzhou Taibaiyan middle east segment unstable slopes as the example[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2004, 23(1): 78 - 80, 89.(in Chinese))
- [8] 王 权, 何晓明. 滑体剩余下滑力计算在滑坡治理削坡方案设计中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 9(1): 20 - 27, 46.(WANG Quan, HE Xiaoming. Application of calculation of residual slip force of sliding mass to the design of cutting and retaining scheme for controlling landslide[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1998, 9(1): 20 - 27, 46.(in Chinese))
- [9] 陶志平, 周德培, 岳志勤. 滑坡推力计算中传递系数法的改进研究[J]. 路基工程, 2006, (5): 80 - 81.(TAO Zhiping, ZHOU Depei, YUE Zhiqin. Research for improving on transfer coefficient method applied to calculating landslide thrust value[J]. Subgrade Engineering, 2006, (5): 80 - 81.(in Chinese))
- [10] 郑颖人, 时卫民, 杨明成. 不平衡推力法与 Sarma 法的讨论[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 3 030 - 3 036.(ZHENG Yingren, SHI Weimin, YANG Mingcheng. Discussion on imbalance thrust force method and Sarma's method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(17): 3 030 - 3 036.(in Chinese))
- [11] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980: 30 - 33.(PAN Jiazheng. Antisliding stability of construction and analysis of landslides[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1980: 30 - 33.(in Chinese))
- [12] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50021 - 2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50021 - 2001 Code for geotechnical investigation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [13] 苏爱军, 冯明权. 滑坡稳定性传递系数计算法的改进[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(3): 51 - 55.(SU Aijun, FENG Mingquan. Improving on transfer coefficient method applied to landslide stability analysis and landslide thrust value calculation[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, 13(3): 51 - 55.(in Chinese))
- [14] 胡修文, 唐辉明, 刘佑荣. 传递系数法的模型试验验证[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 63 - 66.(HU Xiuwen, TANG Huiming, LIU Yourong. Verification of transfer coefficient method applied to landslide stability analysis by physical model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 63 - 66.(in Chinese))
- [15] 张友良, 冯夏庭, 范建海, 等. 抗滑桩与滑坡体相互作用的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 839 - 842.(ZHANG Youliang, FENG Xiating, FAN Jianhai, et al. Study on the interaction between landslide and passive piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 839 - 842.(in Chinese))