

考虑层间作用的多层滑坡分析方法

杨 涛, 周德培, 罗阳明

(西南交通大学 岩土工程系, 四川 成都 610031)

摘要: 对于发育多层滑面的复杂滑坡, 工程中较少考虑各滑面之间的相互影响, 而所提出的分层计算方法, 考虑了各滑面之间的相互影响。各层分别核算其滑坡稳定性, 抗滑结构设计中的滑坡推力及其分布形式。上层滑体按照一般的传递系数法计算, 下层滑体按照考虑上层滑体在上层滑面处的作用力传递系数法计算。算例分析表明, 分层计算方法将使多层滑面的复杂滑坡抗滑结构物的设计更为合理。

关键词: 岩土力学; 多层滑面; 传递系数法; 滑坡稳定性; 滑坡推力

中图分类号: TU 413.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)07-1129-05

A NEW METHOD CONSIDERING INTER-LAYER INTERACTIONS FOR ANALYSIS OF MULTI-LAYERS LANDSLIDES

YANG Tao, ZHOU De-pei, LUO Yang-ming

(Department of Geotechnical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: There are complex landslides with several layers of slipping plane in the geotechnical engineering. In this paper, a new method to analysis the multi-layers landslide is presented. Every layer of sliding masses when calculating the slope stability and landslide-thrust distribution is analyzed. The upper layer of the sliding mass is analysed by using the common transfer coefficient method. When the lower layers of the sliding masses are analysed, the weight of the upper layer but the effects of the upper mass on the layer below can be ignored. The method was applied to a practical project, and the results show: (1) the safety factor of the slope calculated by the new method is with the same as the general method; (2) because the anti-sliding pile intercepts the sliding mass, the landslide thrusts of different layers of sliding mass act on the pile separately. Therefore, the total landslide thrust is varied with different methods; (3) when the upper sliding mass has different design safety factors, the landslide-thrust of the upper mass and the total landslide-thrust are different. The calculated results by the new method make the design of anti-sliding structures more reasonable.

Key words: rock and soil mechanics; complicated landslide; transfer coefficient method; slope stability; landslide thrust

1 引言

大型滑坡中常常发育多层滑面, 将滑坡体切割为多层滑体构成的复杂滑坡。由于各层滑面所处的

坡体位置和滑面岩土力学强度参数的不同, 则各层滑体具有不同的稳定性。对于多层滑坡整体稳定性的评价, 工程中常用的做法是以稳定性最差的滑面的安全系数作为整个滑坡的安全系数, 认为滑坡的失稳只会沿此最弱面滑移。在抗滑结构物的设计中

收稿日期: 2003-09-19; **修回日期:** 2003-11-09

基金项目: 社会公益研究专项基金资助项目(2001DIB20113)

作者简介: 杨 涛(1973-), 男, 硕士, 2002年于西南交通大学岩土工程专业获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。
E-mail: 03017003@163.com。

进行下层滑面滑坡推力计算时,也极少考虑上层滑面的影响。实际上,具有多层潜在滑面的滑坡产生双层或者是多层滑移的现象也可见于工程。如新滩斜坡即在下伏基岩面产生整体下滑的同时,坡体的上层还产生二次平行下滑^[1]。对于地质历史上曾经发生过多层滑移的复杂滑坡,各滑面稳定性对滑坡体整体稳定性的作用更加不容忽视^[2]。在参数相同的情况下,各种条分法的计算结果差别不大^[3,4]。本文以传递系数法为基础,讨论了考虑上层滑面影响的各层滑面稳定性的计算和各层滑体的滑坡推力计算及其分布形式的确定。

2 滑坡稳定性计算

2.1 上层滑面的稳定性计算

传递系数法又称不平衡推力传递法,属于条分法的一种,且在目前的工程设计中最为常用^[5,6]。其稳定性计算方法简便。在相关的规范中也将其作为计算作用于抗滑桩上的滑坡推力的方法^[7]。

在用传递系数法计算滑坡稳定性时,上层滑体条块受力如图1所示。该法假定条块间的合力平行于上一条块的底面,不考虑力矩的平衡,所以不考虑条间力的作用点位置,而只是根据力的平衡条件,逐条向下推求,直至最后一条块的推力为0^[8]。

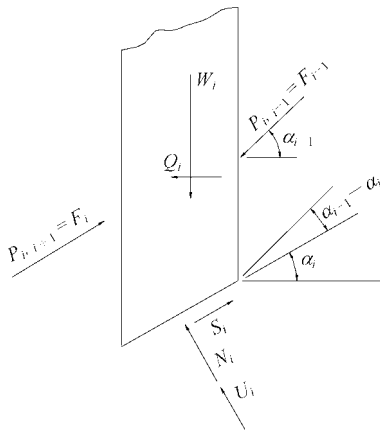


图1 上层滑体条块受力

Fig.1 Force-bearing slice in the upper slide-block

图1所示序号为*i*的一个分条,其上作用有垂直荷载 W_i 和水平荷载 Q_i (均指合成值)。右侧面承受上一分条的不平衡下滑力 $P_{i,i+1} = F_{i+1}$, 倾角为 α_{i+1} 。左侧面上为本条的不平衡下滑力 $P_{i,i-1} = F_i$, 倾角为 α_i , 底部为法向反力 N_i 、孔隙压力 U_i 及切向反力 S_i 。将各力投影在底面上,用平衡方程^[9]表示如下:

$$F_i = (W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i) -$$

$$\left[\frac{c_i l_i}{K} + \frac{(W_i \cos \alpha_i - U_i - Q_i \sin \alpha_i) f_i}{K} \right] + F_{i-1} \psi_{i-1} \quad (1)$$

其中,

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{f_i}{K} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i) \quad (2)$$

式(1)即为条块间作用力的计算公式,其中 K 为滑面的安全系数。对于第一分条,式(1)的最后一项为0,用上式逐条计算,直到最后一条 n ,要求算出的 $F_n = 0$,由此计算 K 。

对于多层滑坡而言,图1所示的条块*i*通过底面切向力 S_i 和法向力 N_i 与下层滑坡的条块相联系,假定条间力 F_i 和 F_{i+1} 均为已知,根据条块*i*的力的平衡条件可得

$$S_i = Q_i \cos \alpha_i + F_{i+1} \cos(\alpha_{i+1} - \alpha_i) + W_i \sin \alpha_i - F_i \quad (3)$$

$$N_i = F_{i+1} \sin(\alpha_{i+1} - \alpha_i) + W_i \cos \alpha_i - U_i - Q_i \sin \alpha_i \quad (4)$$

为便于计算上层滑体对下层滑体的作用力,将 S_i 、 N_i 分解为水平方向和垂直方向,有

$$F_q = N_i \cos \alpha_i + S_i \sin \alpha_i \quad (5)$$

$$F_p = S_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i \quad (6)$$

2.2 下层滑面的稳定性计算

下层滑体在上覆滑体的作用下处于平衡状态。假定上层滑体对下层滑体的作用通过上层滑面处的切向力 S_i 和法向力 N_i 相联系。图2为万梁高速公路张家坪滑坡的中级浅、中层滑体,图中边坡体长235 m,右侧边坡高89 m。

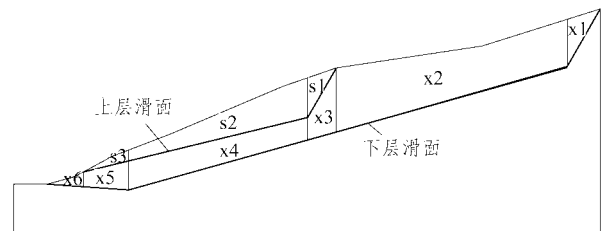


图2 具双层滑面的典型滑坡

Fig.2 A typical landslide with two slipping plane

其下层滑体条块*j*的条块受力如图3所示,与图1不同之处在于考虑了上层滑体条块的作用力。其中, F_q 、 F_p 分别为上层滑体条块*i*底面的水平力和竖直力, W_j 为下层滑体条块*j*的自重,其余符

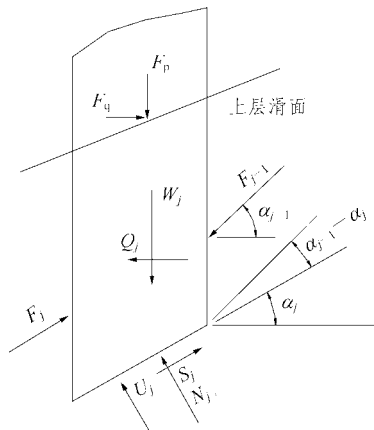


图 3 下层滑体条块受力

Fig.3 Force-bearing slice in the lower slide-block

号同前。将各力投影在底面上，用平衡方程表示如下：

$$F_j = [(W_j + F_p) \sin \alpha_j + (Q_j + F_q) \cos \alpha_j] - \left[\frac{c_j l_j}{K} + \frac{[(W_j + F_p) \cos \alpha_j - U_j - (Q_j + F_q) \sin \alpha_j] f_j}{K} \right] + F_{j-1} \psi_{j-1} \quad (7)$$

其中，

$$\psi_{j-1} = \cos(\alpha_{j-1} - \alpha_j) - \frac{f_j}{K} \sin(\alpha_{j-1} - \alpha_j) \quad (8)$$

式(7)即为考虑上层滑体作用力的下层滑体条间作用力的计算公式，其中 \$K\$ 为下层滑面的安全系数。对于下层滑体第一分条，式(7)的最后一项为 0，用上式逐条计算，直到最后一条 \$n\$，要求算出的 \$F_n = 0\$，由此计算 \$K\$。

常规方法计算下层滑面的安全系数是将上层滑体的自重叠加入 \$W_j\$ 一项中，采用式(1)计算滑坡的稳定性，不考虑上层滑面处的作用力，其计算结果仅反映下层滑面以上滑体的整体稳定性，因忽视上层滑面的存在而没有反映其上各层滑体具有不同稳定性的事实，所以在概念上显得模糊。

本文的分层计算方法在考虑各层滑体相互作用的基础上，对各层滑面分别核算其稳定性，计算结果反映了滑坡体各部分的稳定性，对于认识滑坡体潜在的最危险部位以及辩证施治都有积极的意义，在概念上也显得清晰。

2.3 稳定性分析算例

以图 2 所示的滑坡为例，按上下层滑面取不同的滑面参数计算各滑面的安全系数，表 1 示出了各种方法的计算结果。表 1 中 \$c\$ 为滑面粘聚力，单位

“kPa”；\$\varphi\$ 为滑面内摩擦角，单位“°”；上层滑面的重度取为 \$20 \text{ kN/m}^3\$；下层滑面的重度取为 \$21 \text{ kN/m}^3\$；不考虑地下水的作用。“常规方法”指按照工程中的一般做法，将上层滑面的自重叠加入下层滑面计算下层滑面的安全系数；“分层方法”指本文方法。“常规方法”和“分层方法”的计算结果均是对下层滑面而言。

表 1 滑坡稳定性计算结果

Table 1 Calculated result of slope stability

计算 方案	上层滑面参数		下层滑面参数		计算结果		
	\$c/\text{kPa}\$	\$\varphi/^\circ\$	\$c/\text{kPa}\$	\$\varphi/^\circ\$	上层滑面	常规方法	分层方法
(1)	10	12	10	13.5	0.890	0.999	0.998
(2)	10	13	10	13.5	0.960	0.999	0.998
(3)	10	15	10	13.5	1.103	0.999	0.998
(4)	10	16	10	13.5	1.177	0.999	0.998
(5)	10	15	10	12.0	1.103	0.889	0.889
(6)	10	15	10	14.0	1.103	1.036	1.035
(7)	10	15	10	16.0	1.103	1.186	1.185
(8)	10	15	10	17.0	1.103	1.262	1.261

工程中常见的情况是，上层滑体因受雨水或人为因素等影响而导致上层滑面的岩土强度参数发生变化，因而上层滑体的稳定性也相应发生改变。表 1 中计算方案(1)~(4)所示分层方法的计算结果表明，上层滑面参数的变化不会导致下层滑面稳定性的变化。对下层滑面而言，常规方法和分层方法的计算结果一致。

当上层滑面的岩土参数不变，而下层滑面的岩土参数变化时，相当于考虑地下水变化对下层滑面强度的影响。计算方案(5)~(8)的计算结果表明，常规方法和分层方法的计算结果仍然相差不大，可以认为是一致的。

以上计算结果表明，在分析滑坡的稳定性方面，常规方法和分层方法的计算结果完全一致。

3 滑坡推力及其分布形式

3.1 滑坡推力计算

在上述稳定性计算分析的基础上，很容易得到各层滑体的滑坡推力计算公式：

(1) 上层滑体滑坡推力计算公式为

$$F_i = (W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i) - \left[\frac{c_i l_i}{K} + \frac{(W_i \cos \alpha_i - U_i - Q_i \sin \alpha_i) f_i}{K} \right] + F_{i-1} \psi_{i-1} \quad (9)$$

(2) 下层滑体滑坡推力计算公式为

$$F_j = [(W_j + F_p) \sin \alpha_j + (Q_j + F_q) \cos \alpha_j] - \left[\frac{c_j l_j}{K} + \frac{[(W_j + F_p) \cos \alpha_j - U_j - (Q_j + F_q) \sin \alpha_j] f_j}{K} \right] + F_{j-1} \psi_{j-1} \quad (10)$$

式中： K 为设计安全系数，其余符号同前。

常规方法计算各滑体的滑坡推力均按照式(9)计算，没有考虑上层滑体的影响。因此其计算结果是某一滑面以上滑体的总推力，其上各层滑体对总推力的贡献大小却无法确定。

本文的分层计算方法分别计算各层滑体的推力，作用在抗滑结构物上的总推力是各层滑体推力的合力。这样的处理方法有助于认识各层滑体的推力大小，以便在结构物的设计中加以考虑，使结构设计更趋合理。

仍以图 2 所示的滑坡为例，表 1 的计算方案(1)中，滑坡体处于不稳定状态，今对其进行整治，设抗滑桩位于分块 s2, x4 末，计算上下滑面为不同设计安全系数时的滑坡推力。表 2 所示为滑坡推力计算结果，各参数同表 1。“结果”为按式(9)计算的上层滑体的滑坡推力，“结果”为按式(10)计算的下层滑体的滑坡推力。为便于 2 种方法的对比，并考虑及两层滑面倾角差别不大，将“结果”和“结果”进行代数求和，为“结果”所示。“结果”为按式(9)计算的下层滑面以上滑体的滑坡推力。

表 2 滑坡推力计算结果
Table 2 Calculating result of landslide-thrust

计算 方案	安全系数		滑坡推力计算结果/kN			
	上层滑面	下层滑面	结果	结果	结果	结果
(1)	1.30	1.30	2 055	5 795	7 850	8 476
(2)	1.30	1.20	2 055	3 911	5 966	6 387
(3)	1.30	1.15	2 055	2 969	5 024	5 342
(4)	1.15	1.15	1 400	3 726	5 126	5 342

根据公路建设的有关规范，对高速公路构筑物安全系数取 1.2 ~ 1.3，对于如图 2 所示的张家坪特大型滑坡而言，当滑坡整治抗滑桩的安全系数取为 1.3 时，浅、中层滑体的滑坡推力即可达 8 476 kN，滑坡推力相当巨大，如表 2 中方案(1)的结果所示。倘若再考虑深层滑体，则出现了现行工程措施无法处理的困惑。若将设计安全系数降低为 1.15，滑坡推力大大降低，如表 2 方案(4)所示，为 5 342 kN。但在实际中，浅层滑体显然具有更多的致滑因素，如雨水、工程因素、地震影响等，若浅层滑体的安全系数也取为 1.15，则无法保证浅层滑体的安全，对高速公路的运营安全也存在潜在的威胁。而现行的设计计算理论对此办法不多。

采用本文的分层方法则可以较合理的解决这一困惑，如表 2 的方案(3)所示，浅层滑体的安全系数取为 1.30，其滑坡推力为 2 055 kN，下层滑体的安全系数取为 1.15，其滑坡推力为 2 969 kN，总计推力合力仍较结果为小。据此推力再考虑合理的推力分布形式设计合适的抗滑支挡结构，既解决了滑坡推力过大的难题，也保证了浅层滑体的稳定。如图 2 所示的万梁高速公路张家坪滑坡，采用表 2 中计算方案(3)的滑坡推力计算结果，浅层滑体的厚度较小，但推力较大，因此工程中采用预应力锚索抗滑桩，取得了良好的整治效果。

比较表 2 中结果和可见，传统方法和分层方法所计算的滑坡推力有一定的差别，且差值随设计安全系数的增大而增大。这是因为抗滑桩从滑体中部穿过，将桩后各级滑体分成为独立的坡体部分。各滑体间既有相互影响，又可以独立地作用于抗滑桩所造成的。而在稳定性分析中，上层滑体完全位于下层滑体之中，内部滑面参数的变化不会影响整体稳定性的变化。

3.2 滑坡推力分布形式

具多层滑面的复式滑坡的滑坡推力计算按照本文的分层计算方法，各层滑体分别计算其滑坡推力，进行下层滑体推力计算时，考虑上层滑面的影响。抗滑结构物上的滑坡推力大小和所处的滑体位置有关，滑坡推力的分布形式也分别按照各层滑体的岩性和厚度确定。上层滑体的滑坡推力分布形式采用文[10]推荐的分布函数，可为三角形、梯形或抛物线形分布形式。而下层滑体的滑坡推力则根据滑体的岩性采用梯形或抛物线形分布形式。

各层滑体依据其推力大小和岩性分别确定滑坡

推力的分布形式,避免了常规方法中按照整个滑坡体笼统确定滑坡推力的分布形式而不考虑中间滑面影响的弊端,因此更符合实际情况,使抗滑结构物的设计更为合理。

4 结 语

对于由多层滑面构成的复式滑坡,本文提出考虑分层间作用力的分层滑面稳定性分析方法,考虑了上层滑面对下层滑体稳定性的影响,各层分别核算安全系数。算例分析表明,分层方法和传统方法所求得的滑体稳定性完全一致。在滑坡的工程整治中,上层滑体滑坡推力按照一般传递系数法计算,下层滑体的滑坡推力则需考虑上层滑面处上层滑体对下层滑体的作用力进行计算,各层滑体可以考虑不同的设计安全系数,滑坡推力的分布形式也按各层滑体分别确定。分层方法既考虑了各层滑体之间的相互影响,又体现了各层滑体自身的性质,有利于比较辨别整个滑体中的最危险部位。概念清晰,操作简单,避免了常规方法中按照整个滑坡体笼统确定滑坡稳定性和滑坡推力及其分布形式而不考虑中间滑面影响的弊端,分层方法的计算结果将使结构设计更为符合工程实际。

参考文献(References):

- [1] 贺可强. 大型堆积层滑坡的多层滑移规律分析[J]. 金属矿山, 1998, (7): 15–18.(He Keqiang. The analysis of multi-layer slide rule of large-scale accumulative slide[J]. Metal and Mining, 1998, (7): 15–18.(in Chinese))
- [2] 徐志文, 罗永忠. 三峡库区重庆市奉节县花乐村滑坡成因机制及稳定性分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2002, 13(1): 29–47.(Xu Zhiwen, Luo Yongzhong. The forming cause and the stability analyze of the landslide in Huale village, Fengjie county, the city of Chongqing[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, 13(1): 29–47.(in Chinese))
- [3] 殷宗泽. 土力学学科发展的现状与展望[J]. 河海大学学报, 1999, 27(1): 1–5.(Yin Zongze. The present status, technical advance and development trends of soil mechanics[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(1): 1–5.(in Chinese))
- [4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.(Qian Jiahuan, Yin Zongze. Principle and Calculation of Geotechnics[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1995.(in Chinese))
- [5] 贺建清, 张家生, 梅松华. 弹性抗滑桩设计中几个问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497–502.(He Jianqing, Zhang Jiasheng, Mei Songhua. Inquiring into some question in design anti-slide pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497–502.(in Chinese))
- [6] 张永兴, 李 波, 王桂林. 高层建筑岩石边坡地基稳定性分析方法研究[J]. 重庆建筑大学学报, 1999, 21(2): 1–4.(Zhang Yongxing Li Bo, Wang Guilin. Study on analysis method for rockslide slope foundation stability of the highrise building[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1999, 21(2): 1–4.(in Chinese))
- [7] 中华人民共和国行业编写组. 铁路路基支挡结构设计规范(TB10025–2001)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.(The Professional Standard Compilation Group of People's Republic of China. The Design Criterion of Anti-slide Structure in Railway roadbed(TB10025–2001)[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.(in Chinese))
- [8] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.(Xu Bangdong. The Analysis and Prevention of Landslide[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.(in Chinese))
- [9] 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.(Pang Jiazheng. The Anti-slide Stability of Building and Slide Analysis[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1980.(in Chinese))
- [10] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 517–521.(Dai zhihang. A study of distribution rule of landslide thrust of anti-slide pile and resistance power before pile[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 517–521.(in Chinese))