

抗滑桩阻力上下限解法

An analytical method of the stabilizing force of piles for landslide control using Janbu's generalized procedure of slices

王建锋

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 基于工程上常用的 Janbu 普遍条分法(GPS)和剩余推力法,提出了确定单排或多排抗滑桩抗滑阻力的上、下限计算方法。该法假定桩前、桩后滑动土体具有不同的稳定性系数,或假定桩前、桩后滑动土体具有不同的剩余推力,并且抗滑桩承受的下滑力是水平距离的函数。对于单排桩,借助于下限法可以通过试算确定其设桩范围;对于多排桩,借助于上限法可以通过有限的组合枚举确定其最佳的配置。上、下限法的结合可以巨大降低计算量,同时又能满足工程精度要求。运用该方法还可以确定不宜设置抗滑桩的位置范围。文中的算例展示了该方法的具体运用过程。

关键词 滑坡;边坡稳定性;抗滑桩;加固力;Janbu 普遍条分法;剩余推力法

中图分类号:TU 473.1 文献标识码:A 文章编号:1000-4548(2003)04-0455-04

作者简介 王建锋(1964-),男,河南荥阳人,博士,现任中科院力学所副研究员,主要从事地学与力学结合方面的研究工作。

WANG Jian-feng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract Based on Janbu's generalized procedure of slices(GPS) and the residual thrust method, this paper has presented a simplified calculation procedure, including upper bound method and lower bound method, for estimating the deterrent force induced by stabilizing piles in a landslide. The lower bound method assumed that sliding masses above and below each row of piles are allowed to have different values of residual thrust force or the factor of safety, and that the thrust force is a function of horizontal position. For a single row of piles, the optimization position for pile to be exerted in can be obtained by the lower bound method by trial calculation; for multiple rows of piles, the optimization configuration of the stabilizing piles can be determined by the upper bound method by limited enumeration. The combination of the two methods is greatly able to reduce computational effort for estimating the stabilizing effect without losing largely computational accuracy. It has been illustrated through an example problem that it will have better effect to using multiple rows of piles than single rows to control a large landslide. The presented systematic method can account for all available information of different stabilizing measures in an uniform frame using Janbu's GPS.

Key words landslide; slope stability; landslide stabilizing pile; stabilizing effect; Janbu's generalized procedure of slices; the residual thrust method

0 前言*

文献[1]提出了适用于直径 1~3 m 的挖孔灌注桩加固滑坡的传统抗滑桩阻力计算方法。在此基础上,文献[2]又更加逻辑地改进了传统设计方法,这一改进对于单排桩计算方便,但随着桩排数增加,计算方案将呈指数增加,致使其实际上难于应用。为此,本文基于 Janbu 普遍条分法(GPS)和剩余推力法,提出确定单排或多排抗滑桩抗滑阻力的上、下限相结合的计算方法,可使计算工作量大大减少,而又能满足精度要求。更多的有关单桩的有效设计方法,可参阅文献[3~5]。

1 基本思路

通常,加固力的计算是(见图 1)

$$F_0 + \Delta F = \frac{\sum R_f + P}{\sum T} \quad (1)$$

式中 F_0 是待加固滑坡的稳定性系数; ΔF 为施加抗

滑桩后滑坡稳定系数的增加值,可以预先给定; $\sum R_f$ 、 $\sum T$ 分别为滑动面上的总的抗滑力和下滑力; P 为单排桩或多排桩所承受的下滑力,或所能提供的抗滑阻力。式(1)也可写为

$$P = (F_0 + \Delta F) \cdot \sum T - \sum R_f \quad (2)$$

或
$$P = \sum T - \frac{\sum R_f}{(F_0 + \Delta F)} \quad (3)$$

正如文献[2]所述,传统设计方法存在如下缺点:

(1) 无论桩置于何处,抗滑桩提供的抗滑阻力是一常数,而本质上桩的抗滑阻力应是水平位置的函数。

(2) 对于二维情况,理论上认为同一滑动面同时穿越了滑体和刚性抗滑桩,而实际上是不合理、不严格的。

(3) 传统方法不提供任何关于桩排数的设计方法,

* 基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向支持项目(2002-2005);长江水利委员会综合勘测局支持项目(2002)

收稿日期:2002-09-04

而实用上桩排数不同、各排桩位置及其组合不同,其所提供的抗滑阻力将大为不同。实际上,式(1)~(3)仅适用于滑动面平行于坡面的无限长顺层滑坡。

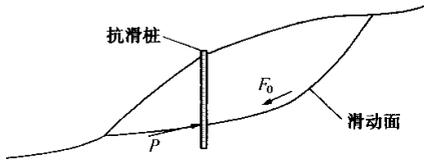


图1 传统的抗滑桩设计方法

Fig.1 Conventional design method of landslide stabilizing pile

为了克服上述缺点,可以假定桩前、桩后滑动土体具有不同的稳定性系数 $F_{s,a}$ 、 $F_{s,b}$,或假定桩前、桩后滑动土体具有不同的剩余推力,并且抗滑桩产生的抗滑阻力是水平距离或 x 坐标的函数,用工程设计要求的安全系数规定值 F_a 、 F_b 直接代替未知的或待求解的稳定性系数 $F_{s,a}$ 、 $F_{s,b}$,进而运用通用边坡稳定性条分法,去求解每根桩所应提供的抗滑阻力。如图2所示,考虑抗滑桩主要承受水平力的作用,假定桩与上部、下部滑体之间的水平相互作用力分别为 P_a 、 P_b 。考虑受横向均布荷载作用的悬臂梁所受最大弯矩位于下三分点,因而也假定滑坡剩余推力作用点处于滑动面以上滑体厚度的下三分点。为了保证桩前后滑体都能达到规定的安全系数,抗滑桩应提供的抗滑阻力为

$$P = P_a - P_b, \quad (4)$$

$$\text{且 } P_a > 0, P_b \geq 0, P_a > P_b. \quad (5)$$

很明显,桩不应设置在不满足上式的地方。

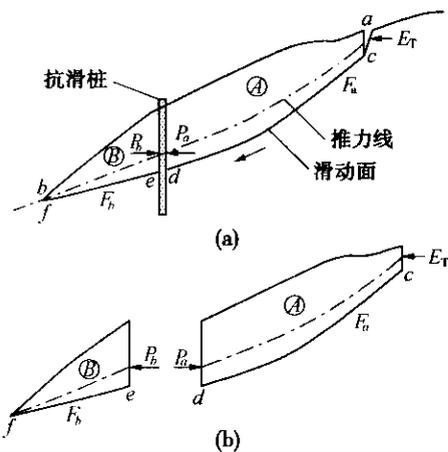


图2 抗滑桩抗滑阻力确定方法

Fig.2 Basic principles of the presented method and derivation of deterrent force equation by Janbu method

2 抗滑阻力方程

本质上,基于任何极限平衡方法都可推出抗滑阻力方程。考虑 Janbu 法为精确法,下面主要基于 Janbu

法讨论阻力方程。有关该方法基本原理和方便的实现方法参见文献[6,7],需要进一步了解本文 Spreadsheet Setup 模板程序的读者,可与笔者联系。

2.1 下限法

对于单排桩,

$$F_a = \frac{\sum_c^d A}{E_T - P_a + \sum_c^d B} \text{ 或 } P_a = E_T + \sum_c^d B - \frac{\sum_c^d A}{F_a}, \quad (6)$$

$$F_b = \frac{\sum_e^f A}{P_b + \sum_e^f B} \text{ 或 } P_b = \frac{\sum_e^f A}{F_b} - \sum_e^f B, \quad (7)$$

式中, A 和 B 是 Janbu 定义的中间参量^[6],即

$$A = \frac{[c' + (p + t - u)\tan\phi'] \cdot \Delta x}{\left(\frac{1 + (1/F)\tan\phi'\tan\alpha}{1 + \tan^2\alpha}\right)}, \quad (8)$$

$$B = \Delta Q + (p + t) \cdot \Delta x \cdot \tan\alpha. \quad (9)$$

鉴于篇幅所限,此处对 Janbu 法所涉及的中间变量不作进一步展开,具体可参见图3及文献[6,7]; E_T 是滑体后缘拉裂缝中水压力。通过上述两式可以计算得到给定安全系数条件下桩所应承担的抗滑阻力 P 。显然,阻力 P 是水平距离 x 的函数。据此,设桩范围可自然得到。

对于多排桩,第 i 排桩的阻力为

$$P^i = P_a^i - P_b^i \quad (i = 1, 2, \dots, k), \quad (10)$$

$$\text{且 } P_a^i > 0, P_b^i \geq 0, P_a^i > P_b^i, \quad (11)$$

式中, k 是桩排数,计数自坡脚向上递增。

相邻排桩阻力分配,可据设计原则预先规定,如

$$\beta^i = P^{i+1}/P^i \quad (i = 1, 2, \dots, k-1), \quad (12)$$

式中, β^i 为阻力分配系数。自坡脚第1排桩以下的滑体,阻力计算采用式(7);自第 k 排桩以上的滑体,阻力计算采用式(6);而介于两者之间的滑体,则采用

$$F_{i,i+1} = \frac{\sum_i^{i+1} A}{P_b^{i+1} - P_a^i + \sum_i^{i+1} B} \text{ 或 } P_b^{i+1} - P_a^i = \frac{\sum_i^{i+1} A}{F_a} - \sum_i^{i+1} B \quad (i = 1, 2, \dots, k-1) \quad (13)$$

计算。由此,可求得各排桩所应承担的抗滑阻力,及其相应的设桩部位。当桩排数增加时,单纯反复运用下限法,可以逐步缩小宜设桩范围。但即使如此,因桩排数增加而增加的计算量,远远超过因缩小设桩范围而减少的计算方案数。

当运用剩余推力法时,算法本质上同上,稍微区别的是在优化运算中,目标函数要令第 i 和第 $i+1$ 排桩之间的滑体的稳定性系数等于设计的安全系数,变数

为 P_b^{i+1} 和 P_a^i 约束条件为 $P_b^{i+1} > 0, P_a^i \geq 0, P_b^{i+1} > P_a^i$ 。

2.2 上限法

如果不计每根抗滑桩向下传递的力 P_b , 则可直接考虑每一分条块作用有一水平指向坡内的作用力 $P_{桩}$ 并认为此力即为单根抗滑桩提供的抗滑阻力(见图 3)。因此,可以仿照上述下限法,直接利用 Janbu 普通条分法,按给定的设计安全系数,计算一定排数桩的不同排列时,每一排列中各桩所应承担的抗滑阻力,其中,同一排列中各个桩分担的荷载可以事先由设计给定。那么,排列中抗滑阻力总和最小者应为设计值,并且此时桩的位置相应得以确定。

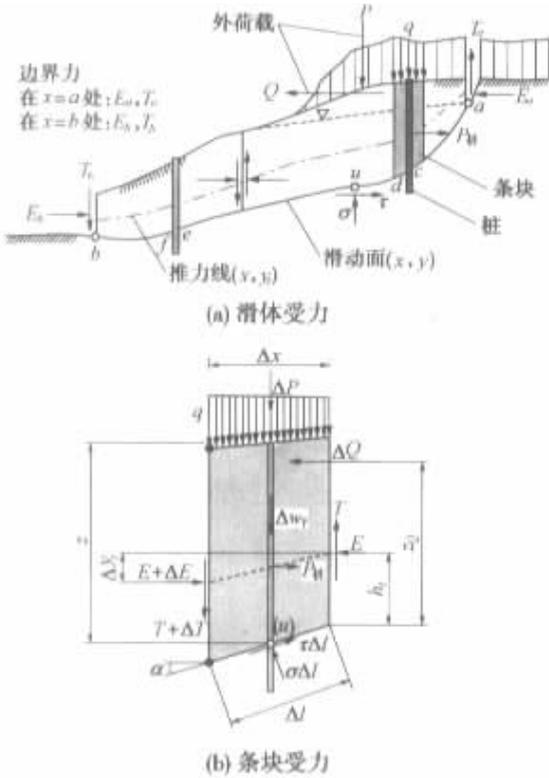


图 3 考虑桩的抗滑阻力时 Janbu 普通条分法的符号定义

Fig.3 Definitions and notations used for Janbu's generalized procedure of slices considering the stabilizing pile

自然地,上限法适合于设计安全系数较低工程。另外,其最重要的优点是计算简单。假定土条块数为 n , 桩排数为 m , 且一般地 $m < n$, 那么上限法的计算方案数为

$$S_{sup} = n!(n - m)!, \quad (14)$$

而下限法的计算方案数为

$$S_{sub} = 2^m \cdot n!(n - m)! \quad (15)$$

随着桩排数增加,下限法计算量呈指数增长,尤其是当桩排数大于 3 时,下限法计算量将是多数工程难以承受,此时上限法自然成为实用的工程设计方法。

但是,上限法通常不能给出不宜设桩的范围。因

此,这里建议结合上述两种方法的特点,首先用下限法计算单排桩时不宜设桩的范围,之后即可用上限法计算所需排数桩,在初步确定的设桩范围内的最佳排列位置及其所提供的阻力。

由于随着桩排数增多,滑坡剩余推力逐步得以控制,实际上 P_{bi} 已经逐步接近于零,因此此时上限法不会导致精度丢失。

3 例 题

三峡库区云阳塞坝滑坡区内的崩滑堆积物平台前缘发育一次生滑坡,称谓“柏杨湾次级滑坡”(见图 4)。该滑坡前缘即为移民小区。滑坡分布高程 290 ~ 355 m,纵向长 270 m,宽约 85 m,平面呈长条状,分布面积 $2.0 \times 10^4 \text{ m}^2$,体积 $28 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{ m}^3$,由黏土夹碎石、块石、大孤石组成,结构松散。其成因为平台后缘土质边坡解体变形破坏堆积而成,因滑坡发生时的分异作用,前缘多大块石和大孤石,后缘以粉质黏土夹碎石、碎块石为主。

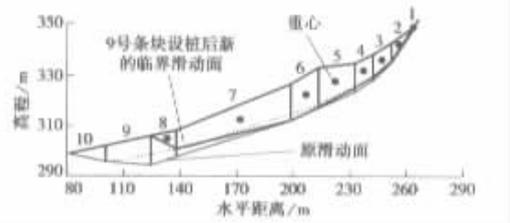


图 4 三峡库区云阳塞坝 柏杨湾次级滑坡

Fig.4 Bo Yang Wan landslide in Yunyang county, the Three Gorges

由滑带土室内静三轴、饱和固结快剪、现场大剪试验结果,以及附近类似滑坡滑带强度参数反演结果,得到 $c = 15.0 \text{ kN/m}^2, \varphi = 13.3^\circ$ 。现场大容重试验结果:天然容重 $\gamma_n = 21.4 \text{ kN/m}^3$,饱和容重 $\gamma_s = 22.5 \text{ kN/m}^3$ 。工程建议安全系数为 1.15 ~ 1.05。计算结果表明,原有滑坡在各种不同工况下的稳定性均不能满足要求(见表 1)。

按工况 2 进行抗滑桩加固设计。表 2 是由下、上限法求得的单排桩处于不同条块时所应承担的抗滑阻力。可以看出,下限法求得抗滑桩宜设置位置在 4 ~ 9 号条块之间,因阻力对水平位置不敏感,因此具体的最佳设桩位置并不明确;上限法则不能显示出设桩范围,但其对水平位置相对敏感,其最佳设桩位置处于所需抗滑阻力最小的第 9 号条块上。对于单排桩,此时还需验算滑体是否可能沿 9 号条块以上剪出,为此进行了临界滑动面随机搜索,图 4 给出了相应结果,此时对应的最小稳定系数为 0.88,显然 9 号条块上设单桩并不能够稳定整个滑坡。那么,由表 2 看出下一个理想

的设桩位置处于7号条块。同样,还需要对7号条块以上滑体算能否剪出,方法类同,不再赘述。

表1 稳定性计算结果

Table 1 The calculated results with Janbu method and residual thrust method for stability of the landslide

工况	工况条件*	建议安全系数	计算所得稳定系数	
			Janbu法	推力法
1	①+②	1.15	1.031	1.054
2	①+②+③	1.15	1.023	1.009
3	①+②+③+④	1.15	1.010	1.006
4	①+②+③+④+⑤	1.02	1.008	0.952

注 ①天然地下水位 ②自重 ③暴雨地下水位(按饱和重度计) ④建筑外载(按20kN/m计) ⑤地震(VI度, $a = 0.05g$) 推力法计算稳定系数时,据长江水利委员会长江勘测规划设计研究院2002年3月发布的重庆市三峡库区云阳县城塞坝滑坡区工程地质勘察报告,工况中的暴雨地下水埋深为2~3m。

对于双排桩情况,可以由上限法求得两根桩处于不同组合时,各自所应承担的抗滑阻力(见表3)。其中,具有最小抗滑阻力的位置在第7和第9条块上,阻力为659.4 kN/m,此为最佳设桩位置。

由表2、表3可以看出,①设置于7号条块的单桩阻力为1364 kN/m,同时还存在上部滑体剪出的可能。若设置双排桩,则各排桩应承担的阻力为659.4 kN/m,合计1318 kN/m,小于单排桩阻力值,并且不存在滑体进一步剪出的可能,因此该滑坡应设置双排桩。当滑坡体积加大时,单双排桩之间的这种差别可能更明显;②随着单排桩向双排桩的过渡,阻力差别逐步减小,显示出 P_{bi} 已经逐步接近于零,因此上限法的精度不会受到大的影响。上述计算顺利得到了单排桩或双排桩所应承担的阻力及其最佳位置。

表2 单排桩所应承担的抗滑阻力

($F_a = F_b = 1.15$)

Table 2 Results obtained from the upper bound limit method and the lower bound limit method for single row of piles with $F_a = F_b = 1.15$ (kN/m)

条块号	下限法		上限法	
	P_a	P_b	P_{sub}	P_{sup}
1	15.0	-1438.1	1453.1	1907.8
2	387.2	-1065.9	1453.1	1753.2
3	1187.8	-265.3	1453.1	1732.9
4	1860.5	407.5	1453.1	1563.4
5	2628.9	1175.8	1453.1	1380.0
6	3361.8	1908.7	1453.1	1493.0
7	4101.8	2648.7	1453.1	1364.0
8	4367.9	2914.8	1453.1	1589.0
9	2417.4	964.3	1453.1	1287.0
10	1453.1	-488.8	1941.9	1320.4
平均	2178.1	676.2	1453.1	1446.0

表3 由上限法求得的双排桩所应承担的抗滑阻力

($F_a = F_b = 1.15, \beta_i = 1$)

Table 3 Results obtained from the lower bound limit method for double rows of piles with $F_a = F_b = 1.15$ and $\beta_i = 1$ (kN/m)

条块	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	953	915	886	830	805	822	799	810	766	783
2	915	876	846	795	772	788	767	777	736	751
3	886	846	866	773	751	766	746	756	717	732
4	830	795	773	781	711	724	706	715	680	693
5	805	772	751	711	689	705	688	696	663	676
6	822	788	766	724	705	746	700	709	675	688
7	799	767	746	706	688	700	682	692	659	671
8	810	777	756	715	696	709	692	794	667	679
9	766	736	717	680	663	675	659	667	643	648
10	783	751	732	693	676	688	671	679	648	660

4 结 论

抗滑桩阻力计算及其位置的确定最佳方法如下:用下限法初步确定单排桩设桩范围,进一步由上限法计算多排桩阻力值及其最佳位置。若设计为单排桩,则必须验算桩前后滑体是否会进一步剪出。能够设置多排桩,就尽量不用单排大体量的桩。当多种加固措施并用于一个滑坡体上时,如类似锚索、挡墙、抗滑键工程,其阻力设计方法本质上与本文所述上、下限方法无区别,仅仅将作用力沿水平和垂直方向分解而纳入Janbu法即可。

参考文献:

[1] Nakamura H. Design of rigid dowel piles for landslide control [A]. 4th Int Sympo on Landslides, Vol 2 [C]. 1984. 149 - 154.

[2] Takuo Yamagami, Hisashi Suzuki. A simple estimation of the stabilizing effect of piles in a landslide slope applying the Janbu method. Landslides [R]. Rotterdam: A A Balkema, 1999. 613 - 618.

[3] Poulos H G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement [J]. J S M F D, ASCE, 1973, 99(SM5) 391 - 406.

[4] Low B K, Teh C I. Probabilistic analysis of pile deflection under lateral load [A]. International Conference on Applications of Statistics and Probability (ICASP8) [C]. Rotterdam: A A Balkema, 1999. 407 - 414.

[5] Low B K, Teh C I, Tang W H. Stochastic nonlinear $p - y$ analysis of laterally loaded piles [A]. Corotis et al. Structural Safety and Reliability [C]. Swets & Zeitlinger, 2001. 1 - 8.

[6] Janbu N. Slope stability computation [A]. In Embankment-Dam Engineering (Casagrande volume) [M]. Hirschfeld R C, Poulos S J Krieger Pub Co, 1987. 47 - 86.

[7] Low B K, Tang W H. Probabilistic slope analysis using Janbu's generalized procedure of slices [J]. Computer and geotechnics, 1997, 21(2) 21 - 142.