

文章编号: 1000-582X(2012)07-094-05

抗滑桩抗滑阻力的优化计算方法

万玲^{a,b}, 吴剑^a, 魏作安^{a,b}

(重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室;
b. 复杂煤气层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对传统抗滑阻力计算方法中存在的缺陷, 以不平衡推力传递系数法为基础, 提出了一种简便有效的抗滑桩抗滑阻力优化计算方法, 即矩阵数组法, 该方法不仅可用于单排抗滑桩的设计计算, 获得最小的抗滑阻力和最佳设桩位置, 而且可用于多(双)排桩的优化设计计算。通过工程实例对比, 分析结果显示, 矩阵数组法比传统方法更科学。在应用抗滑桩治理滑坡工程设计计算中, 将矩阵数组法与有限元法进行结合, 则计算结果更可靠、更合理。

关键词: 抗滑桩; 滑坡防治; 抗滑阻力; 岩土工程

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

Optimal calculation method of stabilizing force for anti-slide piles

WAN Ling^{a,b}, WU Jian^a, WEI Zuoran^{a,b}

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control; b. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A new efficient method named matrix method is presented based on the traditional calculation methods of stabilizing force. The method is derived from the thrust force method and designed to address the deficiency of traditional method. It cannot only get the best pile location with minimum stabilizing force when is applied to the design calculation of single-row anti-slide piles, but also be applied to the optimal calculation of multi-row anti-slide piles. The cases comparing results show the method is more reasonable. For major projects of landslide control, the combination of matrix method and finite element method can make the result safer and more accurate.

Key words: anti-slide pile; landslide control; stabilizing force; geotechnical engineering

滑坡灾害具有发生范围广、频率高、危害大等特点。在众多滑坡防治措施中, 抗滑桩具有桩位灵活、防治效果好、易于施工等诸多优点, 所以被广泛地应用于滑坡治理工程中^[1-3]。在抗滑桩的工程设计中, 抗滑桩所承受的, 来自于滑坡体的滑坡推力是抗滑桩工程设计的重要参数之一^[4]。在工程中, 目前主要有 2 种抗滑桩受力计算方法^[5], 但这 2 种方法均

存在一定缺陷, 而且只能应用于单排桩的设计。而目前, 对于双(多)排桩桩身所承受的滑坡推力, 还没有统一的科学有效的计算方法。然而, 双(多)排桩正逐步应用于滑坡治理工程中^[6]。为此, 针对工程中理论依据的不足, 笔者在现有抗滑桩滑坡推力计算方法的基础上, 提出了一种新的并且更为合理和方便快捷的抗滑阻力计算方法。

收稿日期: 2012-02-01

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB201203); 博士点基金资助项目(200806110012)

作者简介: 万玲(1963-), 女, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事岩土力学方向的研究, (E-mail)lhwan@cqu.edu.cn。

1 抗滑桩抗滑阻力的计算

1.1 剩余下滑力曲线

在抗滑桩治理滑坡的过程中,滑坡体与抗滑桩是一个相互依存、相互作用的系统^[7]。滑坡体作用于抗滑桩上的推力也就是抗滑桩为了阻止护体下滑,所必须提供的抗滑阻力。抗滑推力的大小与滑体厚度、滑体密度、滑带形状、抗滑桩的桩位、双(多)排抗滑桩的桩间距等因素有关。在实际工程中,要先了解边坡的地质条件,获得滑体的物理学与力学参数,再在力学分析的基础上,对滑坡稳定性及剩余滑坡推力进行计算。

对于剩余滑坡推力的计算方法,国内普遍采用不平衡滑坡推力传递法^[5],计算公式分别为:

$$P_i = (W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i) - \left[\frac{c_i l_i}{F_s} + \frac{(W_i \cos \alpha_i - u_i l_i - Q_i \sin \alpha_i) \tan \varphi_i}{F_s} \right] + P_{i-1} \psi_{i-1}, \quad (1)$$

$$P_i = F_s (W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos \alpha_i) - [c_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i - Q_i \sin \alpha_i) \tan \varphi_i] + P_{i-1} \psi_{i-1}, \quad (2)$$

式中, ψ_{i-1} 为第 $i-1$ 条块上的滑坡推力的传递系数,在式(1)、(2)中分别为 $\cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\varphi_i}{F_s} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)$ 与 $\cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \tan \varphi_i \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)$ 。 P_i 为第 i 块滑体上的剩余下滑力, W_i 与 Q_i 分别为 i 块滑体上的竖直与水平载荷, u_i 为 i 块滑体上的孔隙水压力, c_i 与 φ_i 分别为 i 块滑体滑面上岩土体的粘聚力与内摩擦角, α_i 与 l_i 分别为第 i 块滑体滑面的倾角与长度, F_s 为稳定系数。

不平衡滑坡推力传递法也可用于计算边坡的稳定系数 F_s , 把每个条块的剩余滑坡推力绘制成曲线,如图 1 中曲线 A。同样的,根据要求的边坡稳定系数,可以得到另一条剩余滑坡推力曲线,如图 1 中曲线 B。

1.2 传统的抗滑阻力计算方法

目前在国内抗滑桩的工程设计中,抗滑阻力有 2 种计算方法^[7]。一种是将设桩位置的设计剩余下滑力(见图 1 曲线 B,大小 E_s)作为抗滑阻力来考虑,

此方法未考虑桩前土体对抗滑桩的作用,故偏于安全,可普遍应用于悬臂桩的设计,而对于沉埋桩,如果用这种方法计算抗滑阻力,结果会偏大,造成资金浪费;另一种方法是将设桩位置的剩余滑坡推力(图 1 曲线 B 与曲线 A)的差值($E_s - E'_s$)作为抗滑阻力,虽然此法可以考虑桩前的土体抗力,但理论基础并不充分,而且有时计算数值过小(原因如后文所述)。而且这 2 种方法均无法应用于双(多)排抗滑桩的抗滑阻力计算。

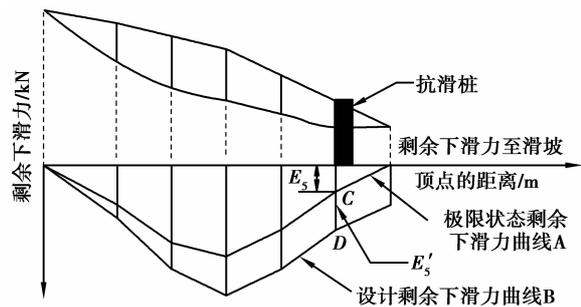


图 1 剩余下滑力曲线

1.3 单排桩抗滑阻力的优化计算方法

根据不平衡剩余滑坡推力法,设 P 为抗滑桩在设桩位置对滑体的抗滑阻力,按照设计所要求的稳系数,计算各条块的剩余滑坡推力,由公式(1)可得设桩位置的剩余下滑力

$$P_i = F_s [W_i \sin \alpha_i + (Q_i - P) \cos \alpha_i] - [c_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i - Q_i \sin \alpha_i + P \sin \alpha_i) \tan \varphi_i] + P_{i-1} \psi_{i-1}. \quad (3)$$

在设置抗滑桩后,滑体必须处于平衡状态,此时,剩余下滑力 $P_n = 0$ 。根据条分法,滑体将被分为 n 个条块,所以,有 n 个有关于 P_i 的平衡方程,其中的 i 为 1 到 $n-1$,在式(3)中,只有抗滑阻力 P 未知,所以方程可以显式求出。在工程设计中,可以首先考虑不同的桩位用以得到最小的抗滑阻力,因此, n 个条块可以考虑 n 种设桩位置。为了编程的方便与书写的清晰,作者用矩阵数组 $a[n]$ 来表示设桩与未设桩,则在不同桩位的情况下,剩余滑坡推力可列成下方程组

$$\begin{cases} P_1 - F_s [W_1 \sin \alpha_1 + (Q_1 - a[1]P) \cos \alpha_1] - [c_1 l_1 + (W_1 \cos \alpha_1 - u_1 l_1 - Q_1 \sin \alpha_1 + a[1]P \sin \alpha_1) \tan \varphi_1] = 0 \\ P_2 - F_s [W_2 \sin \alpha_2 + (Q_2 - a[2]P) \cos \alpha_2] - [c_2 l_2 + (W_2 \cos \alpha_2 - u_2 l_2 - Q_2 \sin \alpha_2 + a[2]P \sin \alpha_2) \tan \varphi_2] + P_1 \psi_1 = 0 \\ P_i - F_s [W_i \sin \alpha_i + (Q_i - a[i]P) \cos \alpha_i] - [c_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i - Q_i \sin \alpha_i + a[i]P \sin \alpha_i) \tan \varphi_i] + P_{i-1} \psi_{i-1} = 0 \\ F_s [W_n \sin \alpha_n + (Q_n - a[n]P) \cos \alpha_n] - [c_n l_n + (W_n \cos \alpha_n - u_n l_n - Q_n \sin \alpha_n + a[n]P \sin \alpha_n) \tan \varphi_n] + P_{n-1} \psi_{n-1} = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中： $a[i]=1$ 表示在 i 条块后设桩， $a[i]=0$ 表示未设桩。

以上算法可以在编程中通过循环语句实现。可以得到在不同桩位条件下的抗滑阻力，而抗滑阻力最小的桩位即为最佳桩位。此法应用数组来标识设桩与未设桩，故此命名为矩阵数组法。

1.4 多排桩抗滑阻力的优化计算方法

双排抗滑桩在国内的滑坡防治中应用较多，多排抗滑桩也有所应用。在双排抗滑桩设计计算时，工程界通常会设定一个滑坡推力传递系数 β 来划定两排桩各自承担滑坡推力的大小，根据文献^[6-8]， β 的取值一般为 $0.65 \leq \beta \leq 1$ ，这里取 β 为 0.65。

(双)多排桩的设计思路与单排桩完全相同。只是对于双排桩，计算规模显著增加，由 n 元方程组变为 $n(n-1)$ 元方程组。根据单排桩的设计方法，用 $a[i]$ 来表示设桩与未设桩，双排桩设计在编程中可以通过二重循环语句来实现，最优桩位即为抗滑阻力最小的设桩位置。多排桩的设计与双排桩相似，只是计算规模进一步加大，不再赘述。

2 工程应用实例

现以三峡库区某高切边坡防护工程为例，针对矩阵数组法的计算做进一步说明。该边坡工程的主剖面如图 2 所示，滑体土的重度为 19.8 kN/m^3 ，滑面土的内聚力 $c=8 \text{ kPa}$ 、摩擦角 $\varphi=15^\circ$ 。按照设计规范要求，加桩后边坡的安全系数要达到 $F_s=1.2$ 。

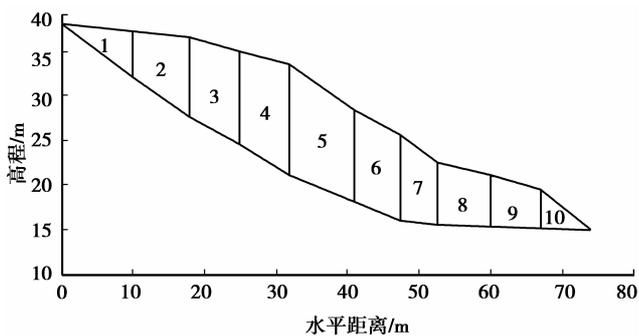


图 2 滑坡计算模型

2.1 单排桩计算结果分析

根据土体物理参数与安全系数的要求，采用悬臂法(方法 1)、沉埋法(方法 2)和矩阵数组法(方法 3)就抗滑桩的受力进行计算，分别得到抗滑桩设置在不同条块后所提供的抗滑阻力，结果如图 3 所示。

由图 3 可知，悬臂法计算得出的抗滑桩阻力比另 2 种方法大很多。究其原因，是由于悬臂法未能

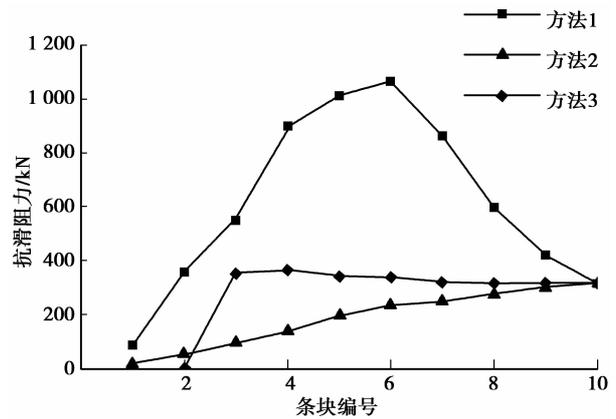


图 3 3 种计算方法所得的抗滑阻力

考虑抗滑桩前的土体抗力。

如果设桩位置在 2~7 号条块后，那么沉埋法和矩阵数组法的计算结果差别也比较大。这是因为沉埋法只能令桩后滑体达到设计所要求的稳定系数，而桩前滑体则只能达到设桩前的稳定系数。由图 1 可知，如果减去抗滑阻力 P ，则曲线 B 上的 D 点将与曲线 A 上的 C 点重合，因此，桩前滑体未能满足设计的安全系数。所以根据沉埋法，实施抗滑桩后只能保障桩后滑体的稳定，而不是整个滑体的稳定，所以此法计算的抗滑阻力偏小，而且抗滑桩位置越靠近滑体后缘，计算所得到的抗滑阻力比真实所需要的抗滑阻力小得就越多。

如图 3 所示，由矩阵数组法可发现，如果抗滑桩设置在第 1 条块和第 2 条块后面，则无法达到要求的稳定系数，因此，抗滑桩不能设置在这些条块后面。这种桩位设置的优劣判断，悬臂法和沉埋法则无法显示。同时，还可以看出，如果抗滑桩设置在第 9 条块或第 10 条块后，在满足设计所要求的稳定系数的条件下，抗滑桩所提供的抗滑阻力最小，均为 318.29 kN，此处为最佳设桩位置。

采用矩阵数组法计算抗滑桩抗滑阻力时，认为桩前条块能够提供其所有的阻滑力。而在实际工程中，桩前土体提供的阻滑力还与抗滑桩的变形还有关系，故桩前条块的抗滑阻力不可能发挥到极限^[9-10]。为此，采用有限元法来验证。

根据上述案例，按照有限元强度折减法的理论^[11-12]，建立有限元计算模型，对桩的抗滑阻力进行求解。抗滑桩桩身材料的设计参数为：弹性模量 $E=30\,000 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\nu=0.2$ ，密度为 $2\,500 \text{ kg/m}^3$ 。依据矩阵数组法的分析结果，抗滑桩设在第 9 条块后。计算模型如图 4 所示。

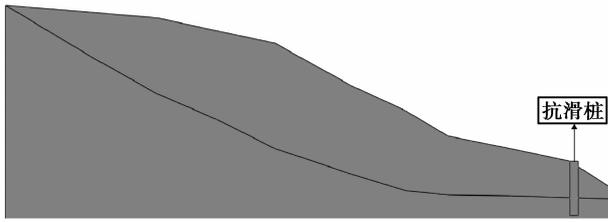


图4 抗滑桩有限元计算模型

抗滑桩埋入深度为全桩长的1/3,桩土结合按无摩擦接触模型处理^[13-14],对桩土接触处的网格进行局部细分,以便计算滑坡推力和桩前抗力。计算收敛后,获得了抗滑桩的滑坡推力和桩前抗力分布,如图5所示。

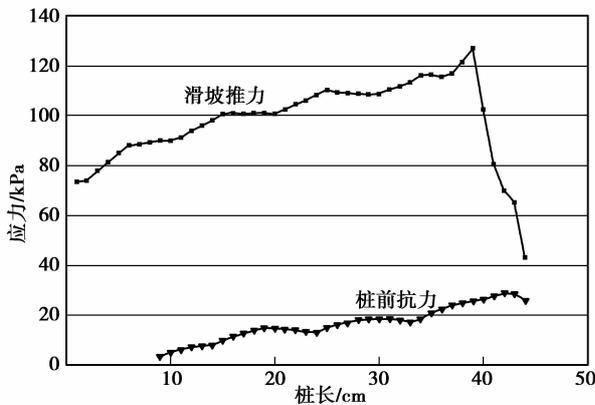


图5 有限元法中滑坡推力与桩前抗力的分布图

对它们进行积分,可得抗滑桩后的滑坡推力为430.31 kN,而桩前土体的抗力为60.433 kN,滑坡推力与矩阵数组法的计算结果相差2%左右,而有限元法得到的桩前抗力却只有矩阵数组法的50%左右。用有限元法得到的抗滑桩所提供的抗滑阻力为369.877 kN。所以可知按矩阵数组法计算抗滑阻力,结果偏小。通过引入传递系数 ξ 对此结果进行修正^[15],则抗滑桩实际设计推力为 $P/(1-\xi)$,那么得此题中 ξ 的与文献[15]中相同,均为0.2。

2.2 双排桩计算结果分析

针对上述实例,采用矩阵数组法进行双排桩设计,计算结果如表1所示。表1中*i*为前桩位置,*j*为后桩位置,表中数据为前排桩的抗滑阻力。当*i*=1时,出现抗滑阻力小于零的情况,所以结果按零处理,而*j*=2时,通过设置双排桩,边坡也未能达到设计要求的稳定系数。

由表1可知,如果用双排桩加固边坡,最佳的设桩位置应为第8条块和第9条块或第8条块和第10条块,此时抗滑桩的抗滑阻力最小。对比单排桩,双排桩所提供总的抗滑阻力与单桩相近。

对于双排桩,桩前土体也无法发挥其所有的抗滑力,所以抗滑阻力的结果也偏小。桩与桩后土体的相互作用已通过 β 值考虑,只用考虑抗滑桩桩前土体的作用,也就是将最终结果除以 $1-\xi$ 即可。

表1 抗滑桩在不同桩位所承受的抗滑阻力

<i>i</i>	<i>j</i>								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	fail	274.79	281.42	263.28	261.32	245.92	243.82	243.86	243.86
2		224.77	226.95	220.84	220.15	214.52	213.72	213.73	213.73
3			219.41	213.70	213.05	207.77	207.02	207.03	207.03
4				216.74	216.08	210.64	209.87	209.89	209.89
5					207.66	202.64	201.93	201.94	201.94
6						201.75	201.04	201.05	201.05
7							193.89	193.90	193.90
8								192.90	192.90
9									192.91

3 结论

1) 基于极限平衡法推导得出的矩阵数组方法,不仅条块受力分析清晰,而且编程后,计算也很

简洁。

2) 在抗滑桩设计计算中,采用矩阵数组方法(方法3)计算抗滑阻力比传统的计算方法更合理,而且有明确的力学理论依据。同时,该方法不仅可以获

得单排桩的最小抗滑阻力和最优设桩位置,而且可以应用于双(多)排抗滑桩的设计计算。

3)针对重要工程的滑坡防治,可将矩阵数组法与有限元分析相结合,利用矩阵数组法确定桩的位置,然后通过有限元法进行验算分析,可使计算结果更为合理、可靠。

参考文献:

- [1] 铁道部科学研究院西北研究所. 滑坡防治[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1977.
- [2] Wei Z A, Yin G Z, Wan L, et al. Case history of controlling a landslide at Panluo open-pit mine in China[J]. *Environmental Geology*, 2008, 54(4): 699-709.
- [3] Wei Z A, Li S H, Wang J G, et al. A dynamic comprehensive method for landslide control [J]. *Engineering Geology*, 2006, 84(1/2): 1-11.
- [4] Matine G R, Chen C. Response of piles due to lateral slope movement[J]. *Computers and Structures*, 2005, 83(8): 588-598.
- [5] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版, 2004.
- [6] 申永江, 吕庆, 尚岳全. 桩排距对双排桩内力的影响[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(7): 1033-1037.
SHENG Jiangyong, LÜ Qing, YUE Shangquan. Effect of pile row distance on internal stress of double-row anti-slide piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(7): 1033-1037.
- [7] 魏作安, 李世海, 赵颖. 底端嵌固桩与滑体相互作用的物理模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2009, 30(6): 2259-2263.
WEI Zuoan, LI Shihai, ZHAO Ying. Model study of interaction mechanism between anti-sliding piles and landslides[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(6): 2259-2263.
- [8] 王旭, 宴鄂川, 吕美君. 埋入式双排桩-土体系桩间内力分配的模拟[J]. *煤田地质与勘探*, 2006, 34(4): 57-60.
WANG Xu, YAN Echuang, LÜ Meijun. Simulation of internal force distribution of embedded double-row anti-slide piles using FEM [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2006, 34(4): 57-60.
- [9] Won J, You K, Jeong S, et al. Coupled effects in stability analysis of pile-slope systems[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(4): 304-315.
- [10] Cheng Y M, Lansivaara T, Wei W B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods [J]. *Computers and Geotechnics*, 2007, 34(3): 137-150.
- [11] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. *Geotechnique*, 1999, 49 (3): 387-403.
- [12] Wei W B, Cheng Y M. Strength reduction analysis for slope reinforced with one row of piles[J]. *Computers and Geotechnics*, 2009, 36(7): 1176-1185.
- [13] Sheng D, Eigenbrod K D, Wriggits P. Finite element analysis of piles installation using large-slip frictional contact[J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32(1): 17-26.
- [14] 雷文杰, 郑颖人, 冯夏庭. 滑坡治理中抗滑桩桩位分析[J]. *岩土力学*, 2006, 27(6): 950-954.
LEI Wenjie, ZHENG Yingren, FEN Xiating. Analysis of pile location on landslide control[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(6): 950-954.
- [15] 张利洁, 唐辉明, 聂文波. 抗滑桩设计推力计算探讨[J]. *三峡大学学报: 自然科学版*, 2002, 24(6): 490-492.
ZHANG Lijie, TANG Huiming, NIE Wenbo. Inquiring into calculation of design thrust of anti-slide pile[J]. *Journal of China Three Gorges University*, 2002, 24(6): 490-492.

(编辑 郑洁)