

抗滑桩与滑坡体相互作用的研究*

张友良 冯夏庭

(中国科学院武汉岩土力学研究所重点实验室 武汉 430071)

范建海 方晓睿

(襄十高速公路建设指挥部 武当山 442000)

摘要 研究抗滑桩与滑坡体间的相互作用机理,提出了模拟抗滑桩与滑坡体之间相互作用的新方法——极限平衡法和有限单元法相结合的方法。给出了加固后滑坡体安全系数计算和抗滑桩内力计算的流程图。最后用开发的软件计算了一个实例,得到了很好的结果。

关键词 抗滑桩, 滑坡, 有限元, 相互作用

分类号 P 642.22, TU 47

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)06-0839-04

1 引言

目前,抗滑桩作为加固滑坡体的一种有效措施已被广泛应用^[1~5]。特别当滑体的滑动面明确,滑动面下覆地层强度较好时,更能体现它的优越性:施工简便、快速、加固效果好,同时在抗滑桩施工过程中还可以不断了解滑体情况,及时调整设计。

一般情况下,在滑体适当位置设置一排抗滑桩即可加固滑体。但当滑体规模较大,设置一排抗滑桩须较大截面、成本偏高时,可考虑设置两排或多排抗滑桩。这时,作用在两排或多排抗滑桩上的滑坡推力的合理计算结果是设计的关键^[1]。目前,对作用在多排抗滑桩上的滑坡推力的计算缺少统一规范,有的是按单排抗滑桩来计算,有的则根据抗滑桩所承受的推力来计算滑体加固后的安全系数。但是,与预应力锚索等主动加固措施相比,抗滑桩属于一种被动加固方法,在抗滑桩设置后经过一段时间才承受边坡由于稳定性降低所产生的滑坡推力,而不是由抗滑桩主动施加给边坡一个外力来提高边坡的稳定性。由于采用的方法各异,实际工程有的设计过于保守,导致不必要的投资;有的设计安全系数太小,危及生命财产安全。

本文提出一种极限平衡法与有限单元法相结合的方法,该方法能够很好地解决滑坡体与抗滑桩相

互作用的问题。它考虑了多排抗滑桩对滑坡体的共同作用,以及抗滑桩与滑动面以下土层的相互作用,同时吸收了极限平衡法简便实用等优点,是工程设计中一个可靠实用的方法。

2 边坡稳定性分析的极限平衡法

边坡稳定性分析的极限平衡法是一个经典方法,它以摩尔-库仑抗剪强度理论为基础,将滑体划分为若干垂直土条,建立作用在这些垂直土条上的平衡方程式,求解边坡的安全系数。工程中传递系数法是应用较多的方法之一,以下用该方法来讨论滑体与抗滑桩之间的相互作用。传递系数法适用于任意形状的滑裂面,它假定条间力的合力与上一条土条底面相平行,根据力的平衡条件,逐条向下推求,直至最后一土条的推力为0。边坡的安全系数和滑坡推力通过下式计算:

$$E_i = (W_i \sin a_i + Q_i \cos a_i) - \left[\frac{c_i l_i}{F_s} + \frac{(W_i \cos a_i - U_i - Q_i \sin a_i) \tan j_i}{F_s} \right] + E_{i-1} Y_{i-1} \quad (1)$$

$$Y_{i-1} = \cos(a_{i-1} - a_i) - \frac{\tan j_i}{F_s} \sin(a_{i-1} - a_i) \quad (2)$$

式中: E_i 为 i 分条末端的滑坡推力; F_s 为边坡安全

2000年9月22日收到初稿,2000年12月18日收到修改稿。

* 湖北省交通厅资助项目。

作者 张友良 简介:男,28岁,在读博士生,主要从事大规模岩土工程数值并行计算、深基坑和边坡工程设计及理论研究和岩土工程高性能软件开发方面的工作。

系数； W_i 为第*i*个分条的重力； a_i 为第*i*个分条所在滑面的倾角； c_i, j_i 为第*i*个分条所在滑面上的粘聚力和内摩擦角； λ_{i-1} 为传递系数； U_i 为作用在第*i*分条上的孔隙水压力； Q 为作用在第*i*分条上的水平力。

按传递系数法计算时，要自上向下计算。首先计算第1分条的剩余下滑力，再计算第2分条的下滑力，直至最后一个分条的下滑力。如果最后一个分条的下滑力小于0，则该边坡是稳定的。因土条间不能承受拉力，故任何土条的推力如果为负值，则此推力不再向下传递，而对下一土条的推力取0。

3 抗滑桩内力计算的有限元法^[3]

有限元法是解决复杂问题的一个有效方法，在很多领域有着广泛的应用。一维杆系单元是一种相对简单的单元，它能很好地模拟抗滑桩与滑坡体的相互作用，并具有简单实用等优点。这里把抗滑桩理想为杆系单元，建立抗滑桩各单元节点上内力和外力的平衡方程。平衡方程建立了基本未知量和外荷载之间的关系，令结构的全部节点位移为 $A^T = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]$ ，作用在节点上的荷载为 $P^T = [M_1 \ M_2 \ \dots \ M_n]$ ，用 K 表示总体刚度矩阵，则平衡方程可表示为

$$KA = P \tag{3}$$

抗滑桩桩身一般采取两节点四自由度梁单元，节点位移包括节点转角和垂直于单元轴线的线位移，节点力是杆端弯矩和剪力。其单元刚度矩阵可表示为

$$K = \frac{EI}{l^3} \begin{bmatrix} 12 & 6l & -12 & 6l \\ 6l & 4l^2 & -6l & 2l^2 \\ -12 & -6l & 12 & -6l \\ 6l & 2l^2 & -6l & 4l^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中： l 为单元长度， E 为抗滑桩材料弹性模量， I 为抗滑桩截面惯性矩。

抗滑桩对滑动面上下桩前土体产生的作用力可由弹性地基局部变形理论计算^[5]。地基土对地基梁反力集度与地基梁的挠度间的关系为

$$P_d = k_d w \tag{5}$$

式中： k_d (力/长度³)为地基土对抗滑桩的抗力系数，或称为弹性地基梁的基床系数。根据最小势能原理，可得地基刚度矩阵为

$$K_d^e = \int_c N^T k_d N dx \tag{6}$$

式中： N 为单元的形函数，选取不同类型的单元， N 将有不同的具体形式。对于两节点 Hermite 单元的地基刚度矩阵具体表达式为

$$K_d^e = k_d l \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中： $a_{11} = 0.371\ 428\ 61$ ， $a_{12} = 0.052\ 380\ 95l$ ， $a_{13} = 0.128\ 571\ 43$ ， $a_{14} = -0.030\ 952\ 4l$ ， $a_{21} = 0.052\ 380\ 95l$ ， $a_{22} = 0.009\ 523\ 81l^2$ ， $a_{23} = 0.030\ 952\ 4l$ ， $a_{24} = 0.001\ 339\ 29l^2$ ， $a_{31} = 0.128\ 571\ 43$ ， $a_{32} = 0.030\ 952\ 4l$ ， $a_{33} = 0.371\ 428\ 61$ ， $a_{34} = -0.052\ 380\ 95l$ ， $a_{41} = -0.030\ 952\ 4l$ ， $a_{42} = -0.001\ 339\ 29l^2$ ， $a_{43} = -0.052\ 380\ 96l$ ， $a_{44} = 0.009\ 523\ 81l$ 。

通过有限元计算，可以得到抗滑桩桩身任一点上的变形、位移、弯矩、剪力以及抗滑桩对滑动面以上桩前土体的作用力和滑动面以下土体的变形及土体对抗滑桩的抗力。

4 抗滑桩与滑坡体相互作用模型

首先分析抗滑桩与滑坡体之间的相互作用力(图1)。从图1中可以看出，在滑动面以上，作用在抗滑桩上的外荷载有滑坡推力 E_i 、滑动面以上桩前滑体的抗力 $q(x)$ ；在滑动面以下，作用在抗滑桩上的地基反力有桩前地基抗力 $t(x)$ 和桩后地基抗力 $t'(x)$ 。作用于桩上的滑坡推力，可由设计位置的推力曲线确定。抗滑桩上的滑坡推力分布图形可为矩形、梯形、三角形，具体根据滑体的性质和厚度等因素确定^[2]。

抗滑桩与滑坡体的相互作用可通过如下方式进行考虑：把每根抗滑桩作为一个特殊的分条，该分条承受上一分条的滑坡推力 E_i ，并将抗滑桩对桩前土体的作用力 $\int q(x)dx$ 传递给下一分条，并作为

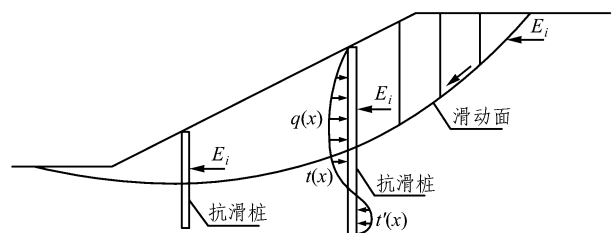


图1 抗滑桩与分条间的作用力
Fig.1 Interactive force between the passive pile and slices