

似土质边(滑)坡抗滑桩后滑坡推力分布模式的近似理论解析

肖世国

(西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 抗滑桩后侧滑坡推力的分布模式直接影响着桩体内力的大小及分布特征, 从而影响着抗滑桩设计的合理性。考虑实际工程设计状态, 根据对似土质滑体的水平微层极限平衡分析, 建立了桩后滑坡推力的近似解析表达式。结果显示桩后滑坡推力呈中间大上下端小的近似抛物线型分布模式, 模拟滑体滑动极限状态的室内试验结果表明, 所提出的近似理论解析方法是较为合理的。

关键词: 似土质边(滑)坡; 抗滑桩; 滑坡推力; 分布模式

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)01-0120-04

作者简介: 肖世国(1973-), 男, 辽宁东港人, 博士, 副教授, 主要从事边(滑)坡稳定性和支挡结构分析理论方面的研究。E-mail: xiaoshiguo126@126.com。

Approximate theoretical solution of distribution modes of landslide thrust on anti-sliding piles in soil-like slopes or landslides

XIAO Shi-guo

(Civil Engineering School, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The distribution mode of landslide thrust on anti-sliding piles directly determines the internal forces and their distribution characteristics over the piles. So it has an important effect on the reasonability of design for the anti-sliding piles. Considering real design conditions for the anti-sliding piles in a practical project, pressure formulae of the landslide thrust are provided approximately by the limit equilibrium analysis on differential horizontal layer of sliding body in soil-like slopes or landslides projects. The formulae indicate that the distribution mode is parabolic along the longitudinal axis of direct anti-sliding segment of the pile with smaller value at its two ends than that at its middle part. The results of laboratory model tests on the limit status of sliding body movement show the approximate theoretical method given is realistic.

Key words: soil-like slope or landslide; anti-sliding pile; landslide thrust; distribution mode

0 前言

对于边(滑)坡治理中常用的抗滑桩, 由于受荷段的滑坡推力分布模式不同, 直接影响着桩体内力的大小及其分布状况, 因此应该较为准确地确定桩后滑坡推力的分布模式, 以更加合理分析桩体内力, 从而优化抗滑桩的设计计算。关于桩后滑坡推力分布模式的以往研究, 归纳文献[1~3]可知, 各国在计算桩后横向滑坡推力大小的方法上有所不同, 但是计算结果一般差别不大。然而, 在滑坡推力分布模式的选择上却分歧很大, 而这二者分布模式选择的是否合理, 直接影响着滑动面以上抗滑桩内力计算的准确性, 进而影响滑动面以下桩身内力计算的准确性, 从而影响抗滑桩结构设计的合理性。根据文献[4], 滑坡推力的分

布模式一般有三角形、矩形和梯形3种。国外多将滑坡体视为散体, 用三角形分布, 合力作用点为滑面以上的下三分点; 国内则多用矩形分布, 合力作用点位于滑面以上的中分点处。两者造成的倾覆力矩差别很大, 尤其对于推力较大的坡体更是如此, 于是影响抗滑结构的大小和埋深。文献[3]建议: 当滑体是一种黏聚力较大的地层(如黏土、土夹石、岩石等)时, 其推力分布模式可近似按矩形考虑; 如果滑体是一种以内摩擦角为主要抗剪特性的堆积体(如砂土), 其推力

基金项目: 教育部博士点新教师基金项目(20070613016); 四川省交通科技项目(sc20070104)

收稿日期: 2008-11-10

分布模式可近似按三角形考虑; 介于二者之间的, 可按梯形分布。对于滑动面以上土体抗力的分布模式, 一般均按三角形考虑。一些试验资料表明^[5-8], 桩侧坡体荷载分布模式总不外乎三角形、矩形、梯形或抛物线形的型式, 不仅分别具有一定的近似意义, 而且还没有形成统一概括理论, 学术意义欠佳。文献[9]探讨了沿桩体受荷段定点剪出稳定性法先计算滑坡推力, 再根据上下两点滑坡推力的增量采用线性分布方法确定其间滑坡推力的分布, 对成昆铁路沿线的某滑坡得到了与试验结果较为一致的分布规律, 但是, 该方法以受荷段各点为剪出点形成假想潜在滑面, 令其稳定系数不超过设计安全系数, 以此分析滑坡推力, 这与实际问题是在一定安全系数下沿原滑面(最不利滑面)达到极限平衡状态的设计理念不符, 同时该法计算的滑坡推力的方向性与实际物理概念有明显差异, 并且操作过程较为繁杂。以上这些研究结果在某种程度上考虑了抗滑桩结构的实际受力状况, 有时使问题得以简化, 有可取之处。但同时应该注意的是, 由于岩土材料的时空变异性, 这些结果在某些情况下是不合适的, 有时甚至与实际情况相差甚远。寻求既准确合理又简单易于实际操作的桩后滑坡推力分布模式的确定方法是解决这一工程实际问题的关键。有鉴于此, 本文主要讨论采用简易的理论解析的方法分析桩后滑坡推力的分布模式, 以在理论上深入认识这一问题的同时, 更好地为实际工程的合理设计服务。

1 分析模型

这里所谓的似土质边(滑)坡, 是指滑体为土体或软弱、破碎或松散的岩体, 即其工程性质相对一般的岩体要差一些, 坡体材料工程性质类似“土体”。在实际工程中, 抗滑桩的设计条件一般按滑体滑移达到极限平衡状态进行设计计算, 因而本文作出假定: 桩后滑体达到极限平衡状态时, 沿滑面和桩后侧面滑动, 即此两面为破裂面。如图1所示的分析模型, 抗滑桩后侧滑体沿滑面滑移达到极限平衡状态, z 为沿桩侧的计算深度, 方向竖直向下。在滑体 OAB 范围内, 自桩顶起向下沿着 z 向任取一微段 dz , 进行隔离体受力分析, 如图1中所示。

为便于分析问题, 再假定该微段的上下表面的剪应力 t 大小相等, 当微段很小时此假定是可以成立的。同时, 假定微段的上下表面作用的正应力与剪应力都沿表面均匀。对于桩侧任一计算点, 到滑面的水平距离为 y_r , 计算深度 z 取为计算层面处桩后对应近似有效滑体部分的重力等效深度(即采用等代面积法处理, 用底边为 y_r 高为 z 的矩形面积代替相应近似有效滑体

重量图形面积), 滑面与桩交点 B 处的计算深度即取为桩顶端 O 到 B 点的长度; a 为计算点处桩侧面挠曲后的倾角(外水平线向上旋转到桩土界面的倾角); q 为计算点水平向对应滑面上点的切线倾角; g 为计算点以上的滑体重度加权平均值; W 为微段的重力, p , t_p 和 s , t_s 分别为微段对应的桩土界面和滑面上的正应力和剪应力。

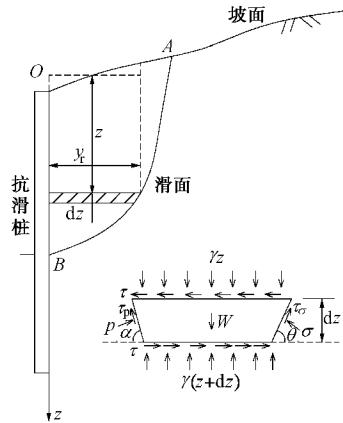


图1 抗滑桩后滑坡推力分析模型

Fig. 1 Mechanical model of landslide thrust on an anti-sliding pile

2 计算方法

根据图1所示的分析模型, 对微段 dz 对应的水平层取隔离体受力分析, 当桩后滑体处于极限平衡状态时, 设桩与滑体界面的外摩擦角为 j_0 、外黏聚力为 c_0 , 滑面的内摩擦角为 j 、黏聚力为 c , 于是有桩土界面上和滑面上的剪应力 t_p 和 t_s 分别为

$$t_p = c_0 + p \tan j_0, \quad (1)$$

$$t_s = c + s \tan j, \quad (2)$$

这样, 根据作用于微段上的竖直与水平两个方向的静力平衡条件, 即两个方向上的合外力分别为零, 可以解出桩后侧面上的正应力(推导过程从略):

$$p = \frac{[g z (\cot q + \cot a) - (c_0 + c)](1 - \tan j \cot q) +}{(1 - \cot a \tan j_0)(\cot q + \tan j) +} \rightarrow$$

$$\leftarrow \frac{[(c_0 \cot a - c \cot q) + t (\cot q + \cot a)](\cot q + \tan j)}{(1 - \cot q \tan j)(\cot a + \tan j_0)}, \quad (3)$$

式中, 层面剪应力 t 按库仑摩擦定律近似取为 $x \tan j_b g z$, 其中 j_b 为滑体的内摩擦角, x 为滑体水平静摩阻力计算系数, 建议取值为 $0 \leq x \leq 0.5$, 一般可取为 $0.2 \sim 0.25$ 。

于是把式(3)代入式(1)可得桩后侧面上的剪应力 t_p 。由于实际工程中桩的挠曲变形一般相对较小, 如桩顶位移常常限定在 $0.6 \sim 0.01h$ (h 为桩长),

所以桩身截面转角一般较小, 使得 a 值很接近于 90° , 因此为简化计算可以近似取 $a=90^\circ$, 即对桩体挠曲变形的影响忽略不计。这样, 可得桩侧面正应力 p 为

$$p = \frac{[g z \cot q - (c_0 + c)](1 - \tan j \cot q) +}{(\cot q + \tan j) +} \leftarrow \frac{[x \tan j_b g z \cot q - c \cot q](\cot q + \tan j)}{(1 - \cot q \tan j) \tan j_0} \quad (4)$$

从而桩后侧面上的剪应力简化算式也可得出, 不再赘述。前述分析的均是桩后侧面上作用的坡体推压应力, 由于是按平面应变问题分析的, 因此若要计算桩后侧面上作用的坡体推压线分布力, 只需将压应力 p 和剪应力 t_p 乘以桩间距即可得到相应方向的线分布力。

应该注意的是, 按照传统的分析模式, 受荷段桩侧水平推力 (沿受荷段桩侧应力合力的水平分量) 应等于桩间滑坡推力的水平分量。实际上由于传统的传递系数法分析时没有考虑滑体前后两侧面的摩阻力, 因而计算的滑坡推力偏大, 即实际滑坡推力不会大于传递系数法计算值。因此, 可据此一定程度地判断本方法的合理性。同时, 也可以据此进一步修正确定滑体水平静摩阻力计算系数 x 。下面通过一室内试验实例说明前述方法的合理性。

3 试验验证

在室内模型槽内进行大型地质力学模型试验模拟可以滑移达到极限状态的滑坡体, 试验模型如图 2 所

示, 经室内常规试验测得滑体的黏聚力为 8 kPa, 内摩擦角为 25° , 重度 $g=20 \text{ kN/m}^3$, 滑带的黏聚力 $c=0 \text{ kPa}$, $j=24^\circ$, 模型桩体与滑体间的黏聚力 $c_0=0 \text{ kPa}$, 外摩擦角 $j_0=15^\circ$ 。滑床为较为密实坚硬的土体。滑体水平静摩阻力计算系数 x 初步取为 0.25。试验中在桩体后侧滑带以上的部分 (受荷段) 以等间距布置 6 个直径低量程土压力盒, 如图 2 中所示, 桩体截面尺寸为 $6.7 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, 桩间距为 20 cm。经过多组试验, 其结果如图 3 所示。把根据前述方法的理论计算结果也表示在该图中, 由二者对比可见, 二者分布模式极为接近, 均呈现中间大两端小的近似抛物线型分布规律, 这与以往的试验研究结果^[5-7]一致, 说明了本文方法的合理性。同时, 需要注意的是, 二者的数量大小上存在一定的差异, 可能与理论计算的假定不完全逼真有关。为了进一步比较本文方法和传统的传递系数法的差异, 可计算出本文方法算得的单宽滑坡水平推力合力为 3.60 kN/m, 而传递系数法的结果为 4.40 kN/m, 可见本文方法比传递系数法偏小。若要保守分析, 保持水平合力值仍为传统的传递系数法结果, 则在确定受荷段滑坡推力分布规律时可以修正调整滑体水平静摩阻力计算系数 x 值, 以在保证水平合力一致的基础上获得更合理的桩侧滑坡推力分布模式。经过计算可以发现, 当 x 取为 0.39 时, 就可达到水平合力一致。于是, 保守修正后的桩后滑坡推力的分布模式如图 3 中所示, 显然, 其合力值大于与试验值更为接近的直接近似理论计算值。

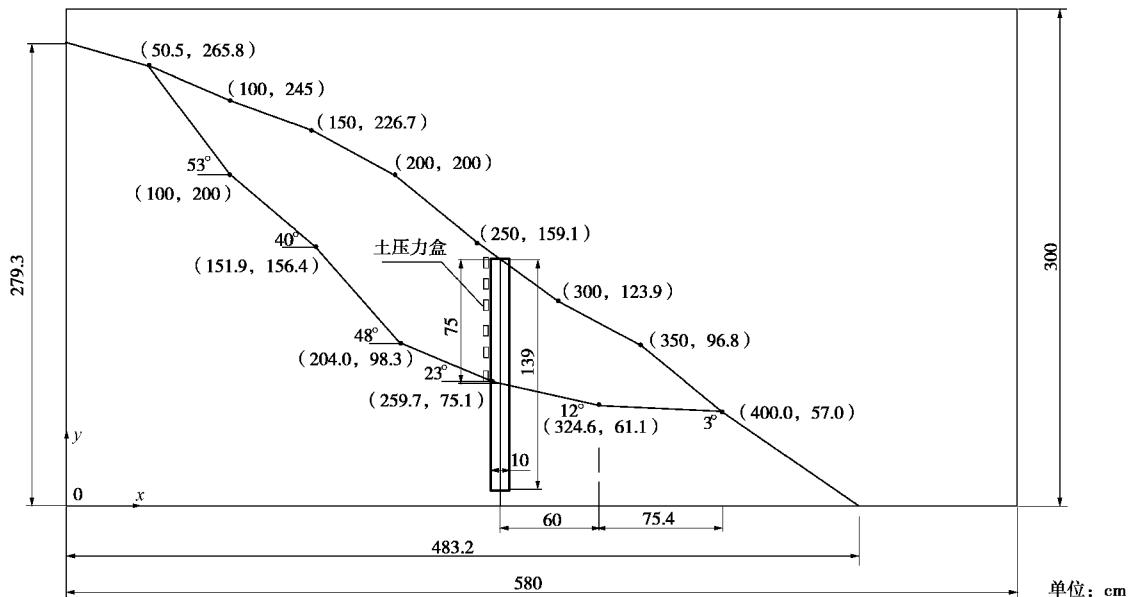


图 2 室内的滑坡试验模型

Fig. 2 Laboratory test model for a landslide

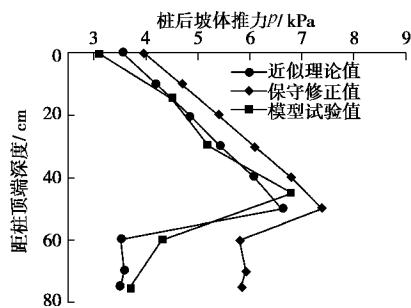


图3 同一坡体理论值与试验值的对比

Fig. 3 Comparison between theoretical and test results

由前述分析可见,在桩体受荷段的中上部通常滑坡推力随着距离桩顶深度逐渐增大,而在桩体受荷段的中下部,尤其在滑面倾角由陡变缓附近,桩后侧滑坡推力会相应有所减小,于是桩后侧滑坡推力的分布模式呈中间大两端小的近似抛物线型特征。从式(4)可以看出,桩后侧滑坡推力的分布与桩侧计算点位置、相应滑面倾角、滑体重度、滑面的黏聚力与内摩擦角、桩土界面的黏聚力与外摩擦角等多种因素密切相关。

4 结语

对于滑体为土体或软弱、破碎或松散的岩体的似土质边(滑)坡,可以近似采用水平微段极限平衡法解析出桩后侧滑坡推力的具体分布模式。桩后滑坡推压应力可用一个显式解析式近似表达,桩后侧滑坡推力的分布模式呈中间大两端小的近似抛物线型特征,具体与桩侧计算点位置、相应滑面倾角、滑体重度、滑面的黏聚力与内摩擦角、桩土界面的黏聚力与外摩擦角等多种因素密切相关。若要保守考虑,可以采用文中建议的修正系数对直接近似理论值进行适当修正。需要注意的是,本文的分析是建立在微段层面上的应力均布的假定基础上的,这与实际有一定的差异,影响了计算结果的绝对精度,需要在以后的研究中深入完善。

参考文献:

- [1] TOMIO Tamotsu Matsui, HONG Won Pyo. Design method for stabilizing piles against landslide—one row of piles[J]. Soils and Foundations, 1981, **21**(1): 21–37.
- [2] HASSIOTIS S, CHAMEAU J L, GUNARATNE M. Design method for stabilization of slopes with piles[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 1997, **123**(4): 314–322.
- [3] 王恭先. 抗滑支挡建筑物的发展动向[C]//滑坡文集(第十三集). 北京: 中国铁道出版社, 1998: 60–64. (WANG Gong-xian. The development of anti-slide support construction[C]// Proceedings of Landslides (Vol. 13). Beijing: China Railway Publishing House, 1998: 60–64. (in Chinese))
- [4] 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 Zi-hang. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on antislide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(4): 517–521. (in Chinese))
- [5] 徐良德, 尹道成, 刘惠明. 滑体为松散介质时桩前滑体抗力分布[C]//滑坡文集(第六集). 北京: 中国铁道出版社, 1988: 84–91. (XU Liang-de, YIN Dao-cheng, LIU Hui-ming. The distribution of resisting forces along piles in bulk medium slide[C]// Proceedings of Landslides (Vol. 6). Beijing: China Railway Publishing House, 1988: 84–91. (in Chinese))
- [6] 徐良德, 尹道成, 刘惠明. 滑体为黏性土时桩前滑体抗力的分布[C]//滑坡文集(第七集). 北京: 中国铁道出版社, 1990: 92–99. (XU Liang-de, YIN Dao-cheng, LIU Hui-ming. The resistance distribution in the slide mass of clayey soil in front of anti-sliding pile[C]// Proceedings of Landslides (Vol. 7). Beijing: China Railway Publishing House, 1990: 92–99. (in Chinese))
- [7] 刘光代, 于济民. 实测滑坡推力及其分布形式[C]//滑坡文集(第四集). 北京: 中国铁道出版社, 1984: 105–115. (LIU Guang-dai, YU Ji-min. The measurement of the thrust of the landslide and its change regularities[C]// Proceedings of Landslides (Vol. 4). Beijing: China Railway Publishing House, 1984: 105–115. (in Chinese))
- [8] 熊治文. 深埋式抗滑桩的受力分布规律[J]. 中国铁道科学, 2000, **21**(1): 48–51. (XIONG Zhi-wen. Force distribution rule of deeply buried anti-slide pile[J]. China Railway Science, 2000, **21**(1): 48–51. (in Chinese))
- [9] 杨涛, 周德培, 张俊云. 抗滑桩滑坡推力分布形式的计算确定[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(3): 322–326. (YANG Tao, ZHOU De-pei, ZHANG Jun-yun. Distribution of land-slide thrust on anti-slide piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(3): 322–326. (in Chinese))