

抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究

戴自航

(湖南大学土木工程学院 长沙 410082)

摘要 根据我国一些抗滑桩模型试验和现场试桩实测试验资料分析结果, 针对滑坡体岩土体性质不同, 提出和推导了相应的滑坡推力和土体抗力分布函数, 并列成图表, 便于应用时查取。一般说来, 与目前国内外习惯采用的分布图式相比, 滑坡推力合力作用点均有所降低, 而土体抗力作用点均有所提高, 更符合抗滑桩实际受力状况。实例分析比较表明, 选择适当的分布函数, 将使抗滑桩设计更为经济合理, 从而提高滑坡治理设计水平。

关键词 抗滑桩, 滑坡推力, 土体抗力, 分布函数

分类号 P 642.22

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)04-0517-05

1 引言

抗滑桩在世界各国的滑坡治理中占有重要地位, 迄今为止, 它是在滑坡治理中应用得最多的工程结构物。与其他杆件结构如柱、桩基础等相比, 有其独特的受力特点——主要承受横向荷载, 有些类似于梁, 但由于它埋藏在地层中, 滑动面的存在和地基土土体抗力的作用, 又使其有别于简单的梁, 成为一种超静定结构。目前, 在抗滑桩内力计算分析中, 常将滑动面上、下分别考虑, 滑动面以上视为弹性定向铰支的悬臂梁, 滑动面以下视为 Winkler 弹性地基梁。

抗滑桩承受的外力, 主要是作用在桩后的横向滑坡推力(有地下水时, 应计入孔隙水压力), 其次是桩前土体抗力(由桩前土体剩余抗滑力、被动土压力或弹性抗力中小者决定)。尽管各国在计算滑坡推力和桩前土体抗力大小方法上有所不同^[1~6], 但计算结果一般说来, 差别不大。然而, 在滑坡推力及桩前土体抗力分布图式的选择上却分歧很大, 而这两者分布图式选择得是否合理, 直接影响着滑动面以上抗滑桩桩身内力的计算准确与否, 进而影响滑动面以下桩身内力计算的准确性, 影响抗滑桩设计的合理性。本文结合模型试验及现场试桩试验的结果, 针对滑坡体岩土类型, 提出了较为准确的滑坡推力和土体抗力分布图式, 并推导了相应的函数表

达式, 可供抗滑桩设计计算参考。

2 习惯采用的滑坡推力和土体抗力分布图式

目前, 一般认为滑坡推力的分布图式有如图 1 所示的三角形、矩形和梯形三种^[5]。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; 国内多用矩形分布, 合力作用点位于滑面以上的中分点 $0.5 h_1$ (h_1 为滑面以上桩长) 处。两者造成的倾覆力矩差别很大, 尤其对于推力较大的滑坡, 更是如此, 因而影响抗滑结构的大小和埋

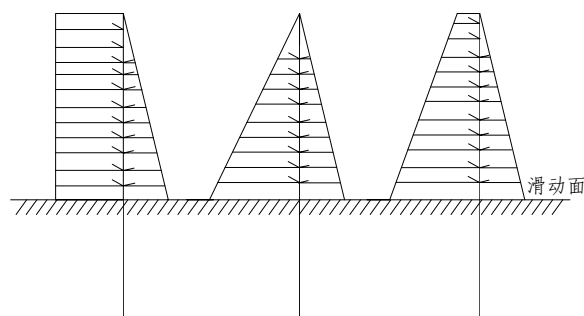


图 1 目前常用的滑坡推力和土体抗力分布图式

Fig.1 Distributions of landslide-thrust and resistance of soil often used at present

2000年5月3日收到初稿, 2000年8月20日收到修改稿。

作者 戴自航 简介: 男, 1966年生, 博士, 现任副教授, 主要从事边坡稳定性分析、滑坡治理、建筑基础、深基坑支护设计方面的教学和研究工作。

深。日本有的学者认为滑坡滑动时, 滑坡推力主要集中在滑动面以上 1~2 m 处, 因而认为用三角形分布较为合适。文[1]建议: 当滑体是一种粘聚力较大的地层(如粘土、土夹石、岩石等)时, 其推力分布图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), 其推力分布图式可近似按三角形考虑; 介于二者之间的, 可按梯形分布。对滑动面以上土体抗力的分布图式, 一般均按三角形考虑。

3 滑坡推力和土体抗力分布规律的分析

上述见解一方面在某种程度上考虑了抗滑结构实际受力状况, 另一方面为了使问题得以简化, 有其可取之处。但在某些情况下是不合适的, 甚至与实际情况可能相差甚远, 因而使抗滑结构的设计有失偏颇, 致使抗滑桩安全储备太大, 资金浪费严重。笔者认为, 滑坡推力分布及其合力作用点位置受滑坡的类型、滑动面形状、部位、地层性质、抗滑结构变形情况及地基系数等综合因素的影响, 但主要与滑坡体结构和抗滑结构物的受力变形有关。对于以抗滑桩为主的柔性支挡结构, 一般情况下, 由于桩头附近变位比下部大, 因而受力比下部小, 又由于滑体与滑动面间存在摩擦, 因而滑面附近推力又有所减小, 这才应是抗滑桩的实际受力状况。

从我国所做的一些模型试验^[7, 8]结果来看, 当滑体为松散介质(如砂土)时, 下滑力基本为三角形分布, 合力作用点约在滑动面以上 0.3 h_1 附近, 桩前滑体抗力图形接近抛物线, 合力作用点在滑动面以上 0.45 h_1 左右处; 当滑体为粘性土时, 下滑力仍基本上按三角形分布, 合力作用点在滑动面以上 0.26 h_1 处, 但更接近于顶点位于滑面附近的抛物线分布; 抗力图形也接近抛物线, 合力作用点约在滑动面以上 0.6 h_1 处。同时, 从我国一些滑坡现场试桩的实测资料^[9]来看, 当滑坡体为抗剪特征以内摩擦角为主的滑体, 如堆积层、破碎岩层时, 下滑力接近于地表为零、顶点在滑动面略上的抛物线, 合力作用点在 0.5 h_1 及其以上; 当滑坡体为抗剪特征以粘聚力为主的滑体, 如粘性土时, 当抗滑桩处于弹性阶段时, 滑体抗力基本上呈倒梯形分布; 进入弹塑性阶段后, 滑体抗力图形逐渐变为地表不为零的抛物线形, 合力作用点在滑面以上 0.6 h_1 左右。模型试验结果与试桩实测结果比较一致。

由此可见, 在抗滑桩设计计算中适当降低滑坡推力合力作用点, 提高滑体抗力的合力作用点, 则更能符合抗滑桩实际受力状况, 使抗滑桩设计更加经济合理。

4 滑坡推力和土体抗力分布函数表达式的推导

根据以上试验和分析结果, 作用在抗滑桩上的滑坡推力和滑面以上土体抗力有矩形或平行四边形、三角形、抛物线形和梯形或倒梯形分布形式, 下面分别推导各种分布函数的一般表达式。推导中, 以 E , E' 分别表示设桩位置滑坡推力和桩前土体剩余抗滑力; q , p 分别表示滑坡推力和土体抗力沿桩高的分布集度; h_1 表示滑面以上桩长; 且设滑坡推力或土体抗力合力作用点分别位于桩顶以下 $z_0 = k h_1$ 和 $z'_0 = k' h_1$ 处。

4.1 矩形或平行四边形分布函数

矩形或平行四边形分布函数较简单, 即

$$q = \frac{E}{h_1} \quad (1)$$

4.2 梯形或三角形分布函数^[10]

图 2 为梯形分布示意图。

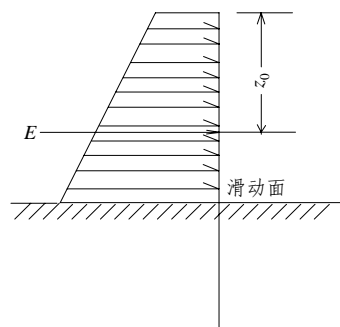


图 2 梯形分布示意图

Fig.2 Trapezoid distribution

设

$$q(z) = bz + c \quad (2)$$

则

$$\int_0^{h_1} (bz + c) dz = E \quad (3)$$

即

$$\left[\frac{b}{2} z^2 + cz \right]_0^{h_1} = E \quad (4)$$

亦即

$$bh_1^2 + 2ch_1 = 2E \quad (5)$$

另有

$$\frac{\int_0^{h_1} (bz + c)z dz}{E} = kh_1 \quad (6)$$

即

$$\left[\frac{b}{3}z^3 + \frac{c}{2}z^2 \right]_0^{h_1} = kEh_1 \quad (7)$$

亦即

$$\frac{b}{3}h_1^3 + \frac{c}{2}h_1^2 = kEh_1 \quad (8)$$

整理式(8)可得

$$2bh_1^2 + 3ch_1 = 6kE \quad (9)$$

联立式(5), (9), 即

$$\begin{cases} bh_1^2 + 2ch_1 = 2E \\ 2bh_1^2 + 3ch_1 = 6kE \end{cases}$$

解此联立方程组, 可得

$$b = \frac{(12k - 6)E}{h_1^2} \quad c = \frac{(4 - 6k)E}{h_1}$$

故梯形分布函数的一般表达式为

$$q(z) = \frac{(12k - 6)E}{h_1^2}z + \frac{(4 - 6k)E}{h_1} \quad (10)$$

当 $k = \frac{2}{3}$ 时, 则 $c = 0$, 即梯形分布演变为三角形分布。

4.3 抛物线分布函数

图 3 为抛物线分布示意图。

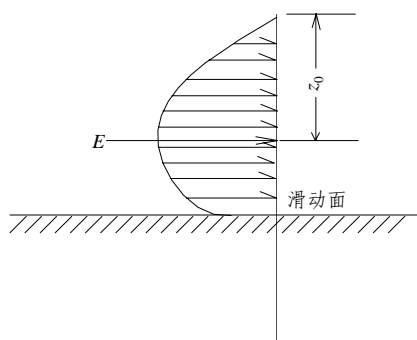


图 3 抛物线分布示意图

Fig.3 Parabola distribution

设有一般抛物线函数

$$q(z) = az^2 + bz + c \quad (11)$$

因一般情况下, $z = 0$ 时, $q(0) = 0$, 故 $c = 0$, 且有

$$\int_0^{h_1} (az^2 + bz)dz = E \quad (12)$$

即

$$\frac{a}{3}h_1^3 + \frac{b}{2}h_1^2 = E$$

亦即

$$2ah_1^3 + 3bh_1^2 = 6E \quad (13)$$

另有

$$\frac{\int_0^{h_1} (az^2 + bz)z dz}{E} = kh_1 \quad (14)$$

即

$$\frac{a}{4}h_1^4 + \frac{b}{3}h_1^3 = kEh_1$$

亦即

$$3ah_1^3 + 4bh_1^2 = 12kE \quad (15)$$

联立式(13), (15), 即

$$\begin{cases} 2ah_1^3 + 3bh_1^2 = 6E \\ 3ah_1^3 + 4bh_1^2 = 12kE \end{cases}$$

解此联立方程组, 得

$$a = \frac{(36k - 24)E}{h_1^3} \quad b = \frac{(18 - 24k)E}{h_1^2}$$

故抛物线分布函数的一般表达式为

$$q(z) = \frac{(36k - 24)E}{h_1^3}z^2 + \frac{(18 - 24k)E}{h_1^2}z \quad (16)$$

当 $k = \frac{2}{3}$ 时, 则 $a = 0$, 即抛物线分布演变为三角形分布。

将式(1), (10), (16)中 $q(z)$, E , k 分别换成 $p(z)$, E' , k' , 即为土体抗力分布函数。

5 滑坡推力和土体抗力分布函数图表

结合模型试验和实测试桩试验结果及以上推导, 笔者根据滑坡体不同岩土类型, 总结出表 1。应用时, 只要选定分布形式及合力作用点位置, 代入分布函数的一般表达式, 就能得到确定的分布函数式, 由此可绘出滑坡推力和土体抗力分布图形。

6 实例比较

笔者于 1998 年成功设计和治理了某滑坡^[11]。原设计中滑坡推力和土体抗力分布采用了习惯的矩形和三角形分布。今考虑采用本文提出的分布函数

进行设计计算, 为较为保守起见, 将滑体岩土类别视为散体, 滑坡推力和土体抗力均按抛物线分布, 合力作用点为 $z_0 = z'_0 = (3/5)h_1$, 即滑坡推力合力作用点较原矩形分布的降低了 $0.1h_1$, 土体抗力合力作用点较原三角形分布的提高了 $0.07h_1$ 。查表 1, 并将 $k = k' = 3/5$ 代入, 可得滑坡推力分布函数为

$$q(z) = \frac{-2.4E}{h_1^3} z^2 + \frac{3.6E}{h_1^2} z \quad (17)$$

土体抗力分布函数为

$$p(z) = \frac{-2.4E'}{h_1^3} z^2 + \frac{3.6E'}{h_1^2} z \quad (18)$$

在不改变桩径和桩距的情况下, 代入相同的已知数据, 同样采用双参数法, 可算得桩身承受的最大弯矩 $M_{\max} = 3\,699.0 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 较原设计计算 $M_{\max} =$

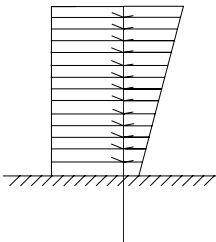
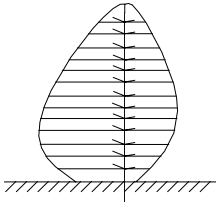
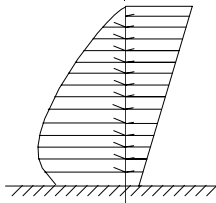
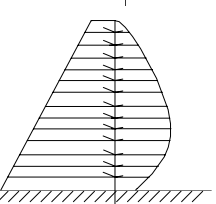
$4\,526.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 明显减小, 原桩身配筋设计弯矩为 $M_u = 4\,600 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 算得最大弯矩处纵筋的配置量为 $38\phi 32$, 现桩身设计弯矩假设为 $M_u = 3\,800 \text{ kN}\cdot\text{m}$, 则可算得最大弯矩处纵筋的配置量为 $31\phi 32$, 可见每根桩可节省主筋 $7\phi 32$, 经济效益是明显的, 尤其对大、中型滑坡将更加显著。

7 结 论

(1) 在我国滑坡治理的工程实践中, 通常假定作用在抗滑桩上的滑坡推力按矩形或平行四边形分布, 桩前土体抗力按三角形分布, 合力作用点位置常与模型试验和实测试桩结果相差较远。试验和实例计算结果表明, 适当降低滑坡推力的合力作用点

表 1 滑坡推力和土体抗力分布函数表

Table 1 Distribution functions of landslide-thrust and resistance of soil

滑坡岩 土类别	滑坡推力 分布形式	滑坡推力合力 作用点 z_0	滑坡推力分布函数 $q(z)$	土体抗力 分布形式	土体抗力合力 作用点 z'_0	土体抗力分布函数 $p(z)$	滑坡推力和 土体抗力示意图
岩石	矩形或平 行四边形	$\frac{1}{2}h_1$	$q(z) = \frac{E}{h_1}$	倒梯形	$\frac{2}{5}h_1$	$p(z) = \frac{-1.2E'}{h_1^2}z + \frac{1.6E'}{h_1}$	
砂土、 散体	三角形~ 抛物线形	$\frac{3}{5}h_1 \sim \frac{2}{3}h_1$	$q(z) = \frac{(36k-24)E}{h_1^3}z^2 + \frac{(18-24k)E}{h_1^2}z$	抛物线	$\frac{1}{2}h_1 \sim \frac{3}{5}h_1$	$p(z) = \frac{(36k'-24)E'}{h_1^3}z^2 + \frac{(18-24k')E'}{h_1^2}z$	
粘土	抛物线~ 三角形	$\frac{2}{3}h_1 \sim \frac{3}{4}h_1$	$q(z) = \frac{(36k-24)E}{h_1^3}z^2 + \frac{(18-24k)E}{h_1^2}z$	倒梯形	$\frac{3}{10}h_1 \sim \frac{2}{5}h_1$	$p(z) = \frac{(12k'-6)E'}{h_1^2}z + \frac{(4-6k')E'}{h_1^2}$	
介于砂 土及粘 土之间	梯形	$\frac{13}{20}h_1$	$q(z) = \frac{1.8E}{h_1^2}z + \frac{1}{10h_1}E$	抛物线	$\frac{2}{5}h_1 \sim \frac{1}{2}h_1$	$p(z) = \frac{(36k'-24)E'}{h_1^3}z^2 + \frac{(18-24k')E'}{h_1^2}z$	

位置和提高土体抗力合力作用点位置,更符合抗滑桩实际受力状况。依此设计抗滑桩将更为经济合理,可有效地提高滑坡治理设计水平。

(2) 在分析模型试验和抗滑试桩实测资料结果基础之上,针对滑坡体不同岩土体类型,建立了相应的滑坡推力和土体抗力分布函数模型,并列成图表,便于实际工程查取和引用。

(3) 本文提出滑坡推力和土体抗力分布函数,是建立在有限的模型试验和现场试桩试验资料分析结果基础之上,经比较,与试验结果吻合很好,可供设计应用和参考,但其合理与否还需更多的试验和大量的工程实例来验证。

参考文献

- 1 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983
- 2 Tomio Ito, Tamotsu Matsui, Won Pyo Hong. Design method for stabilizing piles against landslide—one row of piles[J]. Soils and Foundations, 1981, 21(1): 21~37
- 3 Hassiotis S, Chameau J L, Gunaratne M. Design method for stabilization of slopes with piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(4): 314~322
- 4 贺建涛, 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): 600~602
- 5 朱大勇, 钱七虎, 周早生等. 基于余推力法的边坡临界滑动场[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 667~670
- 6 王恭先. 抗滑支挡建筑物的发展动向[A]. 见: 滑坡文集编委会编. 滑坡文集(第十三集)[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1998, 60~64
- 7 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[A]. 见: 滑坡文集编委会编. 滑坡文集(第六集)[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1988, 84~91
- 8 徐良德, 尹道成, 刘惠明. 滑体为粘性土时桩前滑体抗力的分布[A]. 见: 滑坡文集编委会编. 滑坡文集(第七集)[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1990, 92~99
- 9 徐良德. 抗滑桩桩前滑体出现塑性变形时抗力分布的初步探讨[A]. 见: 中国土木工程学会编. 中国土木工程学会第四届土力学及基础工程学术会议论文选集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986, 441~447
- 10 赵九江, 张少实, 王春香. 材料力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1992
- 11 戴自航, 彭振斌. 土体滑坡的合理设计与计算[J]. 中南工业大学学报, 2000, 31(2): 98~101

STUDY ON DISTRIBUTION LAWS OF LANDSLIDE-THRUST AND RESISTANCE OF SLIDING MASS ACTING ON ANTISLIDE PILES

Dai Zihang

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082 China)

Abstract The different distribution functions of the landslide-thrust and the resistance of soil or rock are studied and deduced based on the results of model test and field test of antislade piles in China. Meanwhile, to be convenient, the study results are provided with a table. Generally speaking, compared with the distribution diagrams that people are accustomed to using at present, the presented results show that the resultant thrust point becomes lower and the resultant resistance point higher, which coincides with the practical state of forces acting on antislade piles. An example shows that the design of antislade piles will be more economical and reasonable by choosing appropriate distribution functions. Therefore, the design level of landslide control will be improved.

Key words antislade pile, landslide-thrust, resistance of soil, distribution function