

## 考虑桩土相互作用的“品”字型抗滑桩计算方法

任永忠<sup>1,2</sup>, 朱彦鹏<sup>1,2</sup>, 李海军<sup>3</sup>

- (1. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050;  
2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;  
3. 甘肃省地矿局 第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 基于对抗滑桩在滑坡防治工程中的应用研究, 提出一种新型组合式“品”字型抗滑桩。抗滑桩由3根单桩通过桩顶连梁连接组成空间结构, 具有刚度大、变形小的特点; 基于位移土压力模型, 建立桩身挠曲线微分方程, 后排桩在滑坡推力作用下发生变形并直接作用于桩间土上, 引入 Boussinesq 解, 通过对桩间土附加应力的求解进一步计算作用于前排桩的附加滑坡推力; 将“品”字型抗滑桩应用于舟曲锁儿头滑坡, 通过现场试验和现场监测与理论计算方法所得弯矩值和位移值的对比表明, 所建立的计算方法合理可行, 为进一步研究桩土相互作用的抗滑桩受力机理提供了一定的依据。

**关键词:** 抗滑桩; 位移土压力; 桩身弯矩; 现场试验; 锁儿头滑坡

中图分类号: U213.1

文献标志码: A

### Calculation Method of the Three Piles of Facing Each Other in Consideration of the Pile-soil Interaction

REN Yongzhong<sup>1,2</sup>, ZHU Yanpeng<sup>1,2</sup>, LI Haijun<sup>3</sup>

- (1. Key Lab. of Disaster Prevention and Mitigation in Civil Eng. of Gansu Province, Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China;  
2. Western Eng. Research Center of Disaster Mitigation in Civil Eng. of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Technol., Lanzhou 730050, China;  
3. Third Inst. Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Based on the research of anti-slide pile in landslide control engineering, a new combined anti-slide pile was put forward, which is composed of three single piles connecting by pile top beam, and has a higher stiffness and less deformation. In the landslide thrust, back row piles produce deformation and the deformation directly effect on the soil between piles. Through the solution of additional stress of soil between piles, the additional effect of landslide thrust in the front row pile was calculated. By using the displacement earth pressure model, the pile flexural differential equation was established. This kind of anti-slide structure was applied to control Suoertou landslide in Zhouqu region, and the field measurements and theoretical calculation methods for the bending moments and displacement values were compared. The results showed that the proposed method is reasonable and feasible, and provides a basis for further study of the anti-slide piles' stress mechanism of the pile-soil interaction.

**Key words:** anti-slide piles; displacement earth pressure; pile moment; field test; Suoertou landslide

近年来, 滑坡地质灾害频频发生, 其中抗滑桩防治结构在滑坡治理中应用较为广泛。按桩体的组合形式抗滑桩分为单排抗滑桩、双排抗滑桩和多排抗滑桩。其中单排抗滑桩的研究和应用最多, 但对于滑坡推力较大且地质条件复杂的滑坡, 单排抗滑桩难以满足设计要求; 双排抗滑桩具有刚度大、抗变形能力强、桩顶位移小的特点, 可以产生良好的抗滑效

果。针对双排抗滑桩平面组合形式和桩土相互作用, 许多学者作了大量的理论研究和试验分析。周德培等<sup>[1]</sup>按照桩土相互作用原则, 通过室内试验研究了微型抗滑桩的抗滑机理, 其抗滑效果是通过发挥微型桩的抗拉强度和桩土地基承载力的优势来抵抗滑坡推力的。何颐华等<sup>[2]</sup>通过室内试验研究了双排护坡桩的内力、变形及土压力分布特性, 并在此

收稿日期: 2014-09-09

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAK12B07)

作者简介: 任永忠(1986—), 男, 博士生, 研究方向: 边坡与滑坡防治治理。E-mail: renyz518@163.com

http://jsuese.scu.edu.cn

基础上将双排桩看成底端嵌固的刚架结构,桩间土压力的分布按滑动土体重量的比例来确定,提出了双排护坡桩的计算方法。在基坑工程中,文献[3-5]研究了前后排桩的土压力分布,同时在考虑空间效应的前提下提出了双排桩的计算方法并应用于工程。万智等<sup>[6]</sup>将土拱原理运用于双排桩的计算方法并编制了计算程序。赵明华等<sup>[7]</sup>基于桩土共同工作机理推导出横向受荷桩侧土体内位移与应力分布的弹性解析解,根据土体变形模量与位移的近似关系获得桩侧地基土体的模量分布与加权模量,将其用于有限元-有限层法进行横向受荷桩的受力变形分析,可近似考虑土体的非均质与非线性等特性,并编制出计算程序。马隼等<sup>[8]</sup>将双排桩的桩间土视为压缩弹簧并采用 VB.NET 开发了双排桩设计软件。郑刚等<sup>[9]</sup>采用弹簧仿真模拟桩间土,同时考虑土层压缩和桩间土加固作用对结构的影响,分析了双排桩结构的有限元杆系模型。

在滑坡地质灾害治理中,双排桩的计算分析理论相对比较薄弱,但双排桩在深基坑中部分理论和成果可以借鉴。因此,作者在平面组合形式的基础上提出“品”字型抗滑桩并建立了计算模型,如图 1 所示;同时对舟曲锁儿头滑坡中“品”字型桩进行了现场监测,与研究结果进行对比,最后得到了很好的结论。

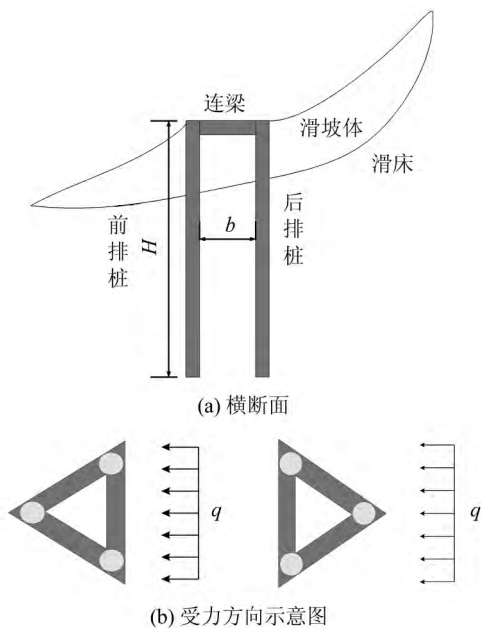


图 1 “品”字型桩示意图

Fig.1 Sketch map of the three piles of facing each other

### 1 计算模型的建立

“品”字型桩是由 3 根单桩通过桩顶连梁组合

成的空间结构,其平面布置形式可以是等腰三角形或等边三角形。以图 1(b)左图受力方向为例分析,滑坡推力首先作用于后排桩和后排桩之间的桩间土,作用于后排桩的滑坡推力部分通过嵌固段传递给稳定基岩,部分通过连梁和前后排桩之间的桩间土传递给前排桩,最后通过前排桩又传向于稳定基岩中。通过以上受力机制的分析建立计算模型,如图 2 所示,针对此计算模型中确定相关参数,分别如下所述。

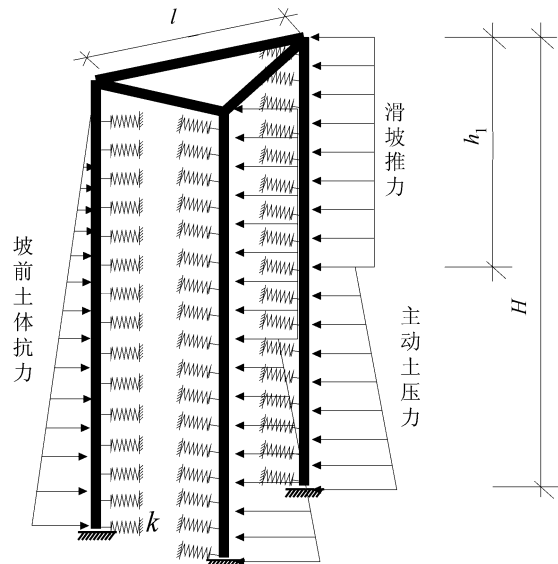


图 2 “品”字型桩计算模型

Fig.2 Calculation model of the three piles of facing each other

#### 1.1 滑坡推力大小及分布形式的确定

滑坡推力大小及其分布形式受滑坡类型、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因素影响,但主要与滑坡体结构和抗滑结构物的受力变形有关。戴自航<sup>[10]</sup>对此问题作了相关的研究,其滑坡推力分布函数通式  $q(x)$  为<sup>[10]</sup>:

$$q(x) = Ax^2 + Bx + C \quad (1)$$

式中,  $q(x)$  为滑坡推力大小的分布函数,  $A$ 、 $B$  和  $C$  为依滑坡体岩土性质不同的参数。

#### 1.2 桩身挠曲线方程中水平地基系数 $K$ 的确定

水平地基系数的取值大小、分布形式直接影响到求解作用在桩土结构物和桩土压力、位移、内力的计算。采用文献[11]提出的双参数法确定水平地基系数,此方法通过现场试验监测可知,能解决单一参数法在地面处的挠度、转角、桩身最大弯矩等不能很好地符合实际桩身受力与变形的问题。双参数法见式(2),通过确定  $c$ 、 $m$  和  $n$  其中之一,预留 2 个参数来反映地基系数特性:

$$K = m(c + x)^{1/n} \quad (2)$$

式中,  $c$  为与岩土类别有关的常数  $m$  为地基系数随深度变化的比例系数  $n$  为随岩土类别而变化的系数。

作者通过确定参数  $c = 0$ , 其中  $m$  和  $n$  为待定参数  $m$  为大于 0 的整数  $n$  为任意实数, 代入参数, 则式(2)可表示为:

$$K = mx^{1/n} \quad (3)$$

式中, 参数的物理意义同式(2)。

### 1.3 前排抗滑桩附加滑坡推力的确定

前、后排桩通过桩间土来传递剩余滑坡推力, 因此如何考虑桩间土的受力变形特征最为关键。从力学机制分析, 在滑坡推力作用下, 后排桩发生变形(主要以弯曲变形为主)挤压桩间土, 进而桩间土在水平方向发生压缩变形, 通过桩间土发生压缩变形抵消部分滑坡推力之后, 其余的滑坡推力传递给前排桩。

计算模型中, 首先通过桩身挠曲线微分方程求解出后排桩在滑坡推力作用下的水平位移  $y$ , 然后采用考虑位移的朗肯土压力, 通过桩身发生的水平位移  $y$  计算出桩周土的位移量  $\Delta y$ , 进一步计算出桩周土反力<sup>[11]</sup>。再次采用 Boussinesq 提出的在弹性半空间表面作用一个竖向集中力时, 半空间内任意点处所引起的应力和位移弹性力学解答可求解出前排桩后侧桩周土附加推力的方法, 最后将此附加推力作用于前排桩, 计算出变形及受力。

桩身任意深度  $z$  处桩移动  $y$  后, 桩移动方向前方土体位移量  $\Delta y$  的表达式为<sup>[12]</sup>:

$$\Delta y = \begin{cases} \frac{\sqrt{r^2(1 + \tan^2 \alpha_0) - y^2 \tan^2 \alpha_0} - y \tan^2 \alpha_0}{\cos \alpha_0 (1 + \tan^2 \alpha_0)} + \frac{y}{\cos \alpha_0} - r, \alpha_0 \in [0^\circ, \arctan(\frac{r}{y})]; \\ \frac{r}{\sin \alpha_0} - r, \alpha_0 \in [\arctan(\frac{r}{y}), 90^\circ] \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\Delta y$  为土体位移量  $y$  为桩身发生的水平位移  $r$  为桩身半径  $\alpha_0$  为桩中心点处土体位移量计算点与水平方向的夹角。

依据土体位移量可得考虑位移的朗肯土压力计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$p = \left[ \frac{4 \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})}{1 - \sin \varphi'} - 4 \frac{4 \tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2})}{1 - \sin \varphi'} - 8 \right] \cdot \frac{(1 - \sin \varphi') \gamma h}{2} \quad (5)$$

$$A = \frac{\tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) - \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}{\tan^2(45^\circ + \frac{\varphi}{2}) - 2(1 - \sin \varphi) + \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})} \quad (6)$$

式中  $\varphi$  为土的内摩擦角  $\varphi'$  为土的等效内摩擦角,  $S_a$  为计算点达到主动土压力时的位移量  $\Delta y$  为土体位移量  $\gamma$  为土体重量  $h$  为计算点与桩顶面的距离。

依据 Boussinesq 解, 在弹性半空间表面作用竖向集中力  $p$ , 则任意深度  $z$  处的附加应力为  $\sigma_z$ , 在文中即为由滑坡推力而产生的对前排桩的水平附加推力  $p_F$ :

$$p_F = \frac{3p'}{2\pi(l \sin \alpha)^2} \quad (7)$$

$$p' = ph_0 b_0 \quad (8)$$

式中,  $p$  为后排桩作用于桩间土上的附加压力  $h_0$  为桩身的等分长度  $b_0$  为桩的计算宽度  $l$  为前、后排桩之间的净距离  $\alpha$  为连梁之间的夹角。

### 1.4 桩间土对前、后排桩的作用力计算

由于前、后排桩间存在桩间土, 其产生的土压力会作用于前、后排桩, 但为简化分析问题及安全考虑, 忽略对后排桩的影响, 仅考虑对前排桩的影响, 由于前排桩对桩间土的阻碍作用, 其滑移面一般很小, 因此其土压力取静止弹性压力<sup>[13]</sup>, 按线性分布考虑。则前排桩后侧滑面以上部分任一点的静止弹性压力为:

$$p_0 = k_0 \gamma z l \sin \alpha \quad (9)$$

式中:  $\gamma$  为桩间岩土体重量;  $k_0$  为桩间岩土体侧压力系数, 可取  $k_0 = \mu(1 - \mu)$   $\mu$  为泊松比;  $l$  为前、后排桩之间的净距离;  $\alpha$  为连梁之间的夹角。

## 2 微分方程的建立及有限差分求解

通过以上对模型各参数的确定, 可建立其微分方程, 同时针对此计算模型基本假定为:

- 1) 桩间土处于弹性工作状态;
- 2) 由于连梁周围岩土体基本均为松散体, 因此不考虑此岩土体对连梁的影响;
- 3) 不考虑连梁的压缩变形, 即连梁为刚体, 前、后排桩桩顶水平位移相等。

后排桩上作用的力系有滑面之上的滑坡推力、滑坡之下的主动土压力, 前排桩上作用的力系有桩间土传递的附加水平推力、桩间土静止弹性压力和坡前土体抗力, 因此需分别建立其微分方程。同时, 在考虑滑坡推力传递过程中已分别对前、后排桩进行了受力分析, 故前、后排桩可独立建立其相应的微

分方程。为此,将在连梁弯矩为 0 处截断,截面剪力转化为桩顶弯矩,前、后排桩弯矩分别记为  $M_H$  和  $M_F$ ,再通过边界条件进行求解。

滑面之上受荷段挠曲线微分方程为:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = Ax^2 + Bx + C - b_0 m_1 x^{\frac{1}{n}} y \quad (10)$$

滑面之下嵌固段主动土压力采用朗肯主动土压力计算,其挠曲线微分方程为:

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = F_a(x) - b_0 m_2 x^{\frac{1}{n}} y \quad (11)$$

式中:  $F_a(x)$  为主动土压力,  $F_a(x) = \gamma k_a b_0 z$ ;  $b_0$  为桩的计算宽度。

将桩由桩顶至桩底离散成  $N$  分段,等量分段的长度为  $h_0$ ,节点编号如图 3 所示,由于差分方程的求解需要在桩顶、桩底及滑动面处各增加 2 个虚拟节点。

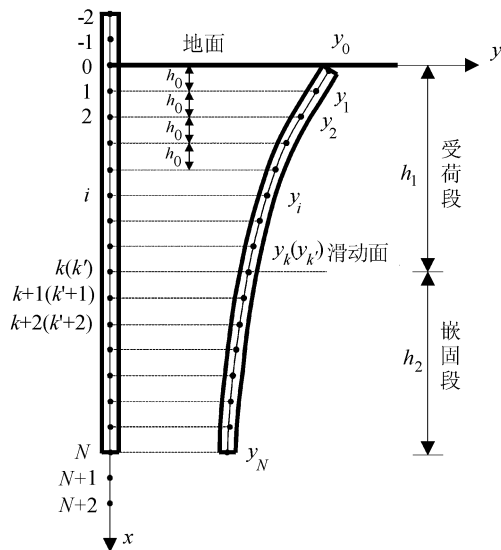


图 3 抗滑桩差分点布置图

Fig. 3 Differential point layout of anti-sliding pile

受荷段任意节点处的控制差分方程为:

$$y_{i-2} - 4y_{i-1} + (6 + \beta_i) y_i - 4y_{i+1} + y_{i+2} = \alpha_i \quad (12)$$

式中:  $i = 0, 1, \dots, k$ ;  $\alpha_i = h_0^4 A (ih_0)^2 / EI + B (ih_0) + C$ ;  $\beta_i = b_0 m h_0^4 (ih_0)^{\frac{1}{n}} / EI$ 。

边界条件: 桩顶处弯矩为  $M_H$ , 剪力为  $T$ , 即当  $x = 0$  时,

$$\begin{cases} \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_H}{EI} \\ \frac{d^3 y}{dx^3} = -\frac{T}{EI} \end{cases} \quad (13)$$

通过差分方程,得:

$$\begin{cases} y_{-1} = 2y_0 - y_1 + Mh_0^2 / EI \\ y_{-2} = 4y_0 - 4y_1 + y_2 + 2h_0^2 (M + Th_0) / EI \end{cases} \quad (14)$$

将  $i = 0$  代入式(12)可得有关  $y_0, y_{-1}$  和  $y_{-2}$  的等式,并将式(14)代入该等式,得:

$$y_0 - 4y_1 + 2y_2 = \alpha_0^* \quad (15)$$

其中,  $\alpha_0^* = \alpha_1 + 2h_0^2 (M - Th_0) / EI$ 。

依次将  $i = 0, 1, \dots, k$  代入式(12),得受荷段各点的差分方程。

嵌固段任意节点处的控制差分方程为:

$$y_{i-2} - 4y_{i-1} + (6 + \beta_i) y_i - 4y_{i+1} + y_{i+2} = \chi_i \quad (16)$$

式中:  $i = k', k' + 1, \dots, N$ ;  $\chi_i = \gamma b_0 k_0 (ih_0)$ ;  $\beta_i = b_0 m h_0^4 (ih_0)^{\frac{1}{n}} / EI$ 。

不同的桩底条件下,嵌固段有不同的差分格式,以桩底条件为固定端求解差分格式,桩底挠度为 0, 转角为 0。

即当  $x = H, y'(x) = 0$  时,

$$\frac{dy}{dx} = 0 \quad (17)$$

可得  $y_N = 0, y_{N+1} = y_{N-1}$ 。

将  $i = N - 1, i = N$  代入式(17)中,可得:

$$\begin{cases} y_{N-3} - 4y_{N-2} + (7 + \beta_{N-1}) y_{N-1} = \chi_{N-1} \\ y_N = 0 \end{cases} \quad (18)$$

最后依次将  $i = k', k' + 1, \dots, N$  代入式(16),可得嵌固段各点的差分方程,限于篇幅,不再细述。

由于桩身受荷段和嵌固段在滑动面处应满足位移、转角、剪力和弯矩的连续条件,因此可得:

$$\begin{cases} y_k = y_{k'} \\ -y_{k-1} + y_{k+1} + y_{k'-1} - y_{k'+1} = 0 \\ y_{k-1} + 2y_k + y_{k+1} - y_{k'-1} + 2y_{k'} - y_{k'+1} = 0 \\ -y_{k-2} + 2y_{k-1} - 2y_{k+1} + y_{k+2} - y_{k'-2} - 2y_{k'-1} + 2y_{k'+1} - y_{k'+2} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

联立以上方程可求解出后排抗滑桩各点的位移,位移中包含桩顶弯矩  $M_H$  和  $T$ ,将此位移量代入式(4)、(5)中计算出桩周土体位移量和土压力,再利用式(7)计算出作用在前排抗滑桩上的水平附加推力,进而采用后排桩的计算方法求解出前排桩各点的位移。由于前排桩位移中包含  $M_F$  和  $T$ ,可通过桩顶的位移协调和刚度条件求出。

通过以上求解出桩身各点的位移,进一步可求解桩身的弯矩、剪力。基于上述理论采用 Matlab 编

写“品”字型抗滑桩桩身内力和位移的计算程序。

### 3 工程实例

#### 3.1 工程概况

锁儿头滑坡位于舟曲县城西侧约 1.0 km 处的白龙江北岸, 滑坡全长 3 300 m, 滑坡最宽处 700 m, 最窄处仅有 80 m, 总面积约  $1.26 \times 10^6 \text{ m}^2$ , 堆积体平均坡度  $12^\circ$ , 主滑方向  $133^\circ$ , 堆积体厚度 20 ~ 100 m 不等, 体积  $7.285 \times 10^7 \text{ m}^3$ , 前、后缘相对高差 670 m, 属特大型断层破碎带滑坡。

该滑坡岩土体为软硬相间的层状、薄层状碳酸盐岩、碎屑岩岩组, 该岩组由泥盆系岩层组成, 岩性主要有千枚岩、板岩及灰岩等, 同时软弱夹层的存在使斜坡易产生蠕滑 - 弯曲、蠕滑 - 拉裂变形破坏, 形成大规模滑坡体, 滑面处的岩质见图 4。

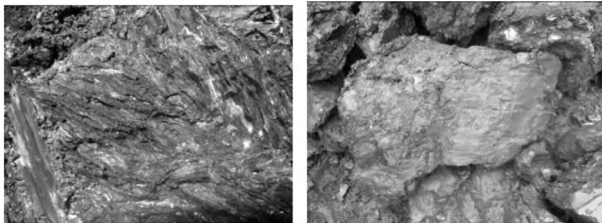


图 4 滑动面处岩质

Fig.4 Rock of sliding surface

#### 3.2 治理方案

在锁儿头滑坡中, 由于滑坡体较长且堆积体较厚, 滑坡推力很大, 单排抗滑桩难以满足设计要求; 同时在滑坡体的下缘设置抗滑桩, 但其下缘堆积体所形成的岩体土边缘走势呈曲线形, 难以通过双排桩加连梁支护方式治理, 为此在多种方案评选的基础上提出了“品”字型抗滑桩。其中一楹如图 5 所示, 此“品”字型抗滑桩靠滑体位置处布置 2 根, 靠外侧布置 1 根, 单桩直径 1.8 m, 桩身混凝土强度等级为 C25, 弹性模量为  $E = 2.8 \times 10^7 \text{ kPa}$ , 桩长依据滑动面的位置取 35 m, 每组 3 根, 群桩中心距为 7.0 m, 每楹单桩桩距为 5.5 m, 主滑轴线上每单位宽度的最大下滑推力为 1 041 kN, 具体岩土体物理参数见表 1。

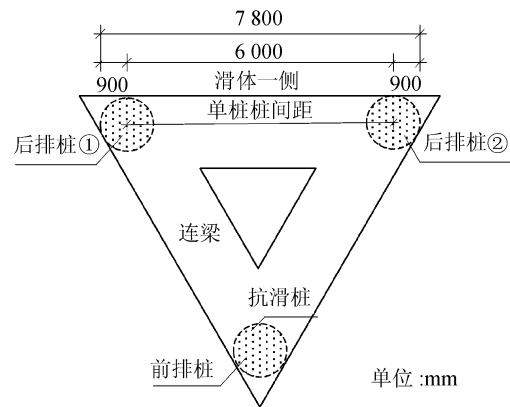


图 5 “品”字型桩平面图

Fig.5 Plane of the three piles of facing each other

表 1 岩体参数

Tab.1 Parameters of rock

	天然重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	抗剪强度(天然)		抗剪强度(饱和)		地基水平抗力系数 $m / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-4})$
		黏聚力 $c_1 / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi_1 / (^\circ)$	黏聚力 $c_2 / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi_2 / (^\circ)$	
碎石土	20.0	10.0	32.0	9.0	31.5	38 000
碳质板岩	18.5	20.0	10.2	19.0	9.7	56 000
碎屑板岩	22.0	112.3	38.9	—	—	112 000

### 4 现场试验

依据舟曲锁儿头滑坡治理工程中抗滑桩桩长 ( $l = 35 \text{ m}$ ) 布置钢筋应力计和混凝土应变计。试验选用埋入式钢筋应力计和混凝土应变计。在桩的受压侧仅布置混凝土应变计, 第 1 层混凝土应变计距离桩顶为 4.0 m, 其余竖向间距每隔 3.0 m 布置 1 个, 共计布置 9 个。钢筋应力计分为 2 种布置方式: 第 1 种布置方式为在桩身受压侧和受拉侧布置, 第 1 层钢筋应力计距离桩顶为 4.0 m, 其余竖向间距每隔 3.0 m 布置 1 个, 其中受压侧钢筋应力计与混凝土应变计布置方式相同; 第 2 种布置方式为环向

均匀布置 6 个钢筋应力计, 第 1 层距离桩顶为 8.5 m, 其余均为 7.5 m, 共计布置 3 层。在试验室内采用无线传感系统接受数据, 见图 6。

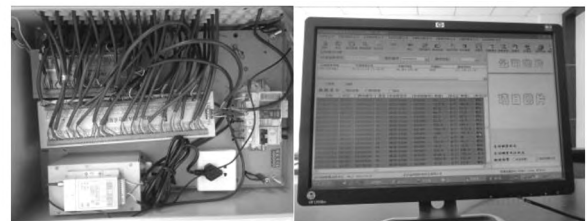


图 6 无线采集和接收设备

Fig.6 Wireless collection and receive apparatus

### 5 试验结果

为验证所提计算方法的正确性,采用 Matlab 编程对工程桩身弯矩及位移计算。在计算中,  $h_0$  取 0.01 m, 桩长  $l = 35$  m, 滑动面为 -18.5 m 处, 滑坡体是由破碎岩体组成, 因此滑坡推力按三角形分布计算, 其他相关参数按工程提供数据而定。

#### 5.1 桩身弯矩分析

图 7 和 8 分别为后排桩和前排桩的桩身弯矩曲线。

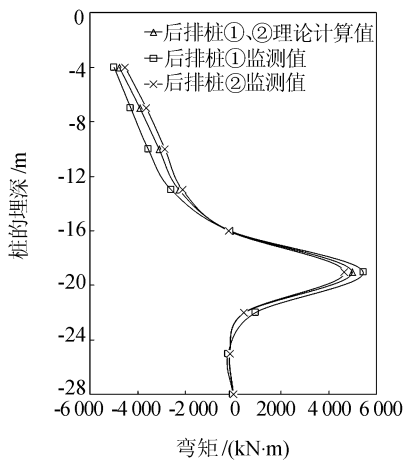


图 7 后排桩身弯矩曲线

Fig. 7 Curves of bending moment of behind piles body

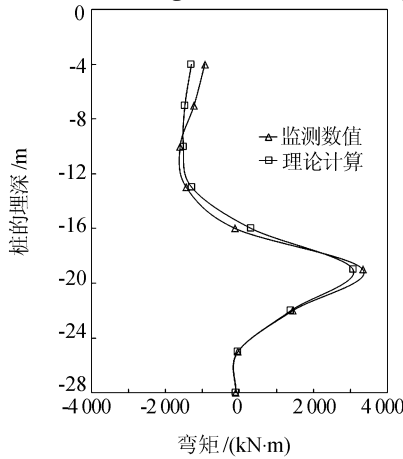


图 8 前排桩身弯矩曲线

由图 7 可知, 最大负弯矩值出现在桩顶位置处, 最大正弯矩值出现在滑动面位置处, 而单排桩身最大正负弯矩一般出现在滑动面位置处, 这与单排桩的桩身受力有本质区别。由于考虑连梁受力的影响, 连梁的轴力在桩顶位置处变为桩顶的剪力, 进而影响桩身弯矩的分布。在桩身受荷段位置处理论计算值位于后排桩①和②监测数值的中间, 这是因为受荷段位置处滑动体的破碎程度不同进而影响水平

地基系数, 而在理论计算中是依据土层的性质不同而采用不同的水平地基系数, 同时由于在实际工程中滑坡的主轴线与后排桩之间的连线并非垂直, 因此抗滑桩产生了扭转变形, 使得后排 2 桩弯矩值不等。而在计算模型中采用的为轴对称, 后排 2 根桩身弯矩相同, 仅给出其中一根桩的桩身弯矩曲线。在嵌固段部位理论计算和监测数值吻合较好, 由于嵌固段部位岩体完整, 具有很好的锚固作用。由图 8 可知, 前排桩在桩顶位置处监测数值比理论计算小, 随着埋深的增加, 逐渐变大, 桩身的正弯矩监测数值比理论计算偏大, 同时也在嵌固段部位吻合较好。从总体弯矩曲线来看, 后排桩最大负弯矩出现在桩顶位置处, 而前排桩最大负弯矩出现在受荷段的中间部位, 这是由于前排桩存在坡前土体, 同时由于滑坡推力比坡前土体抗力大很多, 使得桩顶负弯矩减小。

#### 5.2 桩身水位平移分析

图 9、10 分别为后排桩和前排桩的桩身水平位移曲线。总体来看桩身水平位移主要发生在受荷段部分, 嵌固段桩身水平位移很小。

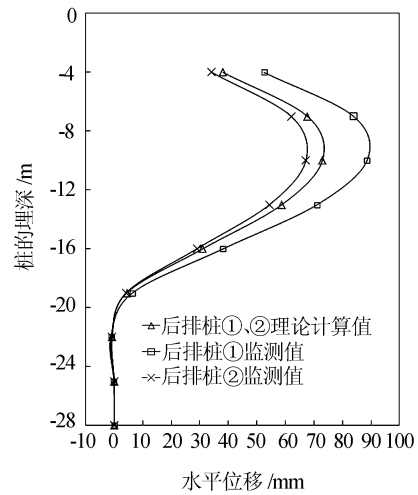


图 9 后排桩身水平位移曲线

Fig. 9 Curves of horizontal displacement of behind piles body

由图 9 可知, 最大水平位移发生在受荷段的中部, 而非出现在桩顶部位, 这主要是因为前排桩通过连梁给后排桩提供反向水平力。而在桩顶以下部位存在桩间土, 在滑坡推力作用下桩间土压缩, 前排桩也发生水平位移, 因此水平位移逐渐变大。由于扭转变形的存在, 2 根后排桩水平位移相差较大, 理论计算值处于监测值的中间, 与后排桩②较为接近。由图 10 可知, 理论计算值与监测数值在桩顶处相差较大, 随着桩埋深的增加, 逐渐趋于吻合。从以上分

析来看,连梁对抗滑桩的水平位移影响很大,起到约束和连接的作用,能更好地调整桩身及连梁的变形。

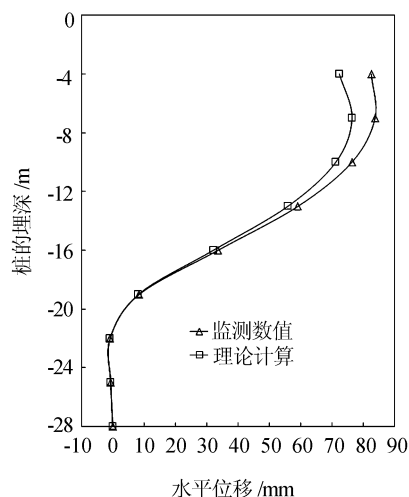


图10 前排桩身水平位移曲线

Fig. 10 Curves of horizontal displacement of front piles body

## 6 结论

作者对新型“品”字型抗滑组合结构进行了计算方法的建立和现场试验,通过以上分析和监测,初步结论与建议如下:

1) 基于位移土压力模型,通过桩间土的压缩变形将前后排桩的受力联系起来,进而建立桩身曲线的微分方程并求解,通过理论计算与现场监测数值相比较可知,此计算方法可行,并且避免了以往研究中关于桩间土土压力在前后排桩上分配的难点。

2) 理论计算和现场监测均显示,前排桩桩身弯矩比后排桩小,后排桩最大负弯矩出现在桩顶,前排桩最大负弯矩出现在桩顶靠下部位,桩身最大正弯矩均出现在滑动面位置处。

3) 通过现场监测,后排桩①和②桩身水平位移相差较大,在滑坡推力作用下产生了扭转变形,由于“品”字型抗滑桩是轴对称结构,因此对于滑坡主线难以确定的滑坡工程具有很好的适用性。

参考文献:

[1] Zhou Depei, Wang Huanlong, Sun Hongwei. Micro-pile composite structure and its design theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1353 - 1362. [周德培,王唤龙,孙宏伟. 微型桩组合抗滑结构及其设计理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1353 - 1362.]

[2] He Yihua, Yang Bin, Jin Baosen, et al. A study on the

test and calculation of double-row fender piles [J]. Journal of Building structures, 1996, 17(2): 58 - 66. [何颐华,杨斌,金宝森,等. 双排护坡桩试验与计算的研究[J]. 建筑结构学报, 1996, 17(2): 58 - 66.]

- [3] Nie Qingke, Hu Jianmin, Wu Gang. Deformation and earth pressure of a double-row piles retaining structure for deep excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 206 - 211. [聂庆科,胡建敏,吴刚. 深基坑双排桩支护结构上的变形和土压力研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 206 - 211.]
- [4] Wu Gang, Bai Bing, Nie Qingke. Research on calculation method of double-row piles retaining structure for deep excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 159 - 164. [吴刚,白冰,聂庆科. 深基坑双排桩支护结构设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 159 - 164.]
- [5] Bai Bing, Nie Qingke, Wu Gang et al. A calculation model for double-row-pile retaining structures in deep foundation pit considering 3D effects [J]. Journal of Building Structure, 2010, 31(8): 122 - 128. [白冰,聂庆科,吴刚,等. 考虑空间效应的深基坑双排桩支护结构计算模型[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 122 - 128.]
- [6] Wan Zhi, Wang Yisun, Li Gang. Analysis and calculation of retaining structure with double-row piles [J]. Journal of Hunan University: Nature Sciences Edition, 2001, 28(3): 120 - 124. [万智,王贻荪,李刚. 双排桩支护结构的分析与计算[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2001, 28(3): 120 - 124.]
- [7] Zhao Minghua, Zou Xinjun, Luo Songnan et al. Elastic analytic solution to the displacement and stress distribution in the soil around laterally loaded piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 45 - 49. [赵明华,邹新军,罗松南,等. 横向受荷桩桩侧土体位移应力分布弹性解[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 45 - 49.]
- [8] Ma Yun, Wei Zhiyun, Xu Guangli, et al. Development of design software of double-row piles for foundation pits and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,

- 35(3):862-870. [马陨,魏志云,徐光黎,等. 基坑双排桩支护结构设计计算软件开发及应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(3):862-870.]
- [9]Zheng Gang, Li Xin, Liu Chang et al. Analysis of double-row piles in consideration of the pile-soil interaction [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1):99-106. [郑刚,李欣,刘畅,等. 考虑桩土相互作用的双排桩分析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1):99-106.]
- [10]Dai Zihang. Study on distribution laws of landslide-thrust and resistance of sliding mass acting on anti-slide piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4):60-64. [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):60-64.]
- [11]Wu Hengli. The total process nonlinear analysis of lateral loaded pile and witch controlled design—Composite stiffness principle with biparameter method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2001, 20(Supp 1):77-82. [吴恒立. 推力桩非线性全过程分析及控制性设计——综合刚度原理和双参数法[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(增刊1):77-82.]
- [12]Song Linhui, Mei Guoxiong, Zai Jinmin. Application of soil pressure model considering displacements to lateral loaded piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5):1035-1039. [宋林辉,梅国雄,宰金珉. 考虑位移的土压力模型在横向承载桩分析中的应用[J]. 岩土力学, 2007, 28(5):1035-1039.]
- [13]Xiao Shiguo. Analytical method for h-type combined anti-sliding pile retaining landslide or excavated slope and its application to practical projects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7):2146-2152. [肖世国. 边(滑)坡治理中h型组合抗滑桩的分析方法及工程应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(7):2146-2152.]

(编辑 李轶楠)