

# 抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析

王成华<sup>1</sup>, 陈永波<sup>2</sup>, 林立相<sup>1</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 抗滑桩最大桩间距确定的基础理论至今未建立起来, 工程实践中仍依赖专家经验。本文从方桩桩间土拱形成的原理、力学特性论证入手, 较全面地分析了桩间土拱的受力、变形, 力的传递和土拱破坏瞬间的最大桩间距。并建立了最大桩间距平面计算模型。

**关键词:** 抗滑桩; 桩间土拱; 力学特性; 最大桩间距

**中图分类号:** P642.22; TU47 **文献标识码:** A

## 1 问题的提出

前人在大量滑坡防治工程实践中发现, 抗滑桩间的土体会形成类似隧洞顶和桥梁拱圈的作用机理, 称为桩间土拱<sup>[1]</sup>。土拱受到滑坡推力作用后, 立即将推力的大部传递(分摊)到相邻两抗滑桩上, 这就是抗滑桩设计的原理和依据。但有如下问题需进行深入研究:

1. 桩间土拱的形成、影响因素与几何形态;
2. 桩间土拱的受力与抗滑特性;
3. 桩间土拱变形破坏与最大桩间距的确定。

工程技术人员十分关心最大桩间距的确定。桩间距过小会造成工程投资浪费和施工困难; 桩间距过大会使桩间土拱破坏(或未形成), 发生桩间土体向前滑动, 使抗滑桩的抗滑功能无法发挥。因此最大桩间距的确定, 已成为工程设计的关键问题之一<sup>[2]</sup>。

滑坡抗滑桩分方形桩(含矩形柱)和圆形桩两类, 本文研究的是方形桩。桩间土体也十分复杂, 分粘性土、砂性土和淤泥质软土, 本文涉及到的是粘性土。

## 2 桩间土拱的形成与力学特性

### 2.1 桩间土拱的形成

当两抗滑桩之间的土体受到滑坡推力作用时, 土体将推力的大部(或全部)传递到两侧的抗滑桩

上, 由两侧抗滑桩侧摩阻来支撑滑坡推力<sup>[3]</sup>。若抗滑桩侧摩阻之和大于或等于滑坡有效推力时, 滑坡便停止向前滑动。这表明两抗滑桩间土拱已形成。由此得出, 桩间土拱形成的两个必要条件是:

1. 桩间土体有足够的抗压缩、滑移变形强度;
2. 两侧抗滑桩侧摩阻之和大于或等于桩间滑坡推力。

对于第 1 条, 无粘性的砂土, 淤泥质软土和处于流动状态(含水量很高)且较均质的粘性土无法满足。对于第 2 条, 则取决于桩侧粗糙度和桩间距两个因素。若桩侧面摩擦系数远大于桩间土体摩擦系数, 在侧摩阻计算时应用桩间土体的摩擦系数<sup>[4]</sup>。

### 2.2 桩间土拱力学特性

#### 1. 受力分析

假设桩间土拱已形成。图 1 示土拱受力简图。

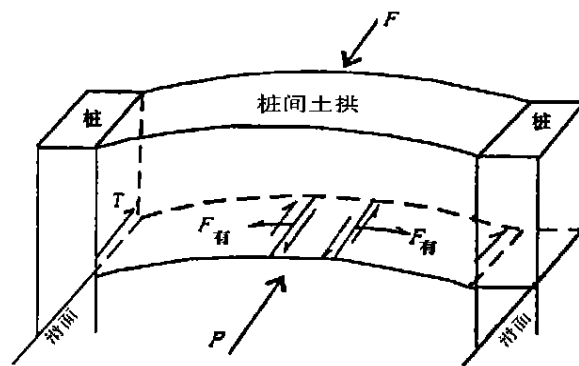


图 1 土拱受力图示

Fig. 1 The sketch of soil arch under pressure

收稿日期: 2001-07-12; 改回日期: 2001-08-28.

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目——进藏东线典型路段泥石流滑坡减灾理论与关键技术研究(编号: KZCX2-306)

作者简介: 王成华(1942-), 男(汉), 重庆市沙坪坝区人, 研究员, 博士生导师, 1966 年毕业于成都理工学院, 水文地质工程地质系。长期从事滑坡、崩塌等山地灾害的形成与防治技术的研究。编著论文集、专著 6 本, 发表论文近 60 篇。

土拱前方首先受到滑坡推力  $F$  的作用;土拱后侧受到被动土压力  $P$  的作用,方向与滑坡推力方面相反;同时土拱本身沿滑动面也存在下滑力和抗滑力的作用问题;土拱接受滑坡推力后,要克服土拱后面的被动土压力  $P$  和土拱本身沿滑动面的抗滑力,余下的才是沿拱圈传递的有效推力  $F_{有}$ ;抗滑桩侧受到有效推力作用后,同时产生桩侧摩阻力  $T$ 。

2. 土拱力学特性

(1)土拱应力分布特征

土拱受到滑坡推力时,有传递滑坡推力的功能。此拱圈横向上的有效推力分布是中间小,向两侧抗滑桩逐渐增大;纵向上,滑动面附近推力最大,向上至地表,推力逐渐减少至 0。

(2)土拱被动土压分析

若土拱后侧的被动土体重量为  $W_{i+1}$ ,则被动土压可用下式计算:

$$P = (W_{i+1} \cos \alpha_{i+1} \operatorname{tg} \phi_{i+1} + C_{i+1} L_{i+1}) - W_{i+1} \sin \alpha_{i+1} \quad (1)$$

式中  $\alpha_{i+1}$ 、 $\phi_{i+1}$ 、 $C_{i+1}$ 、 $L_{i+1}$  分别为被动土体段的滑动面倾角、内摩擦角、内聚力和被动土体段的长度 (m),  $L$  为两抗滑桩之间的距离 (m)。

从式 (1) 中看出,当被动土体的抗剪性能很低时,滑动面的倾角在  $5^{\circ}$  以上,几乎无被动土压存在;当被动土体的抗剪性能较高时,滑动面倾角在  $5^{\circ}$  以下,有被动土压存在。但由于土拱本身允许的压缩滑动变形较小,则利用土拱后的被动土压力作为支撑力就更小。只有当土拱临近破坏时,被动土压才会被充分利用,所以在实际分析计算时可忽略不计。

(3)土拱剩余抗滑力分析

土拱受到滑坡推力后,土拱本身要产生沿滑动方向的变形,存在一个剩余抗滑力。据滑坡稳定性计算模型,土拱中第  $i$  段单位宽的剩余抗滑力为

$$R_{i余} = W_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i + C_i b - W_i \sin \alpha_i \quad (2)$$

式中  $W_i$ 、 $\phi_i$ 、 $C_i$ 、 $\alpha_i$  分别为土拱第  $i$  块重量,内摩擦角,粘聚力,滑动面倾角,  $b$  为土拱沿滑动方向宽 (m),即抗滑桩侧面宽。

(4)土拱有效推力分析

土拱受到滑坡推力作用后,首先要克服沿滑动方向的变形所产生的剩余抗滑力,同时横向上产生压缩变形,将有效推力传递到两侧抗滑桩上。由此可计算第  $i$  段单位宽的有效推力<sup>[3]</sup>

$$F_{i有} = F_i - R_{i余} \quad (3)$$

将式 (2) 代入式 (3) 得

$$F_{i有} = F_i - [W_i (\cos \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i - \sin \alpha_i) + C_i b] \quad (4)$$

若两抗滑桩之间的距离为  $L$  (m),单宽滑坡推力为  $F_i$  (KN),由土拱中间传递到抗滑桩一侧的有效推力为

$$F_{有} = \frac{1}{2} L \{ F_i - [W_i (\cos \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i - \sin \alpha_i) + C_i b] \} \quad (5)$$

若桩间土拱岩性较均匀,则式 (5) 变成

$$F_{有} = \frac{1}{2} L \{ F_i - [W_i (\cos \alpha \operatorname{tg} \phi - \sin \alpha) + C b] \} \quad (6)$$

式中  $W_i$ 、 $\phi$ 、 $C$ 、 $\alpha$  分别为土拱单宽重量、沿滑动面滑动的土体内摩擦角、内聚力和滑动面倾角。

3 土拱变形破坏与最大桩间距估算模型

3.1 土拱变形破坏

土拱受到滑坡推力后,即发生沿滑动方向的压缩滑移变形,同时将滑坡推力向两侧传递到抗滑桩侧面上 (图 2a)。制约这个变形的是土拱内土颗粒的抗剪强度。当变形到两桩之间的平直联线时,即达到最大允许变形,或曰临界变形 (图 2b)。大于这个变形,土拱即发生破坏。土拱发生破坏时,传递到土拱两侧的滑坡推力转向土拱中间,块体产生应力松弛,向滑动方向发生滑移流动 (图 2c)。

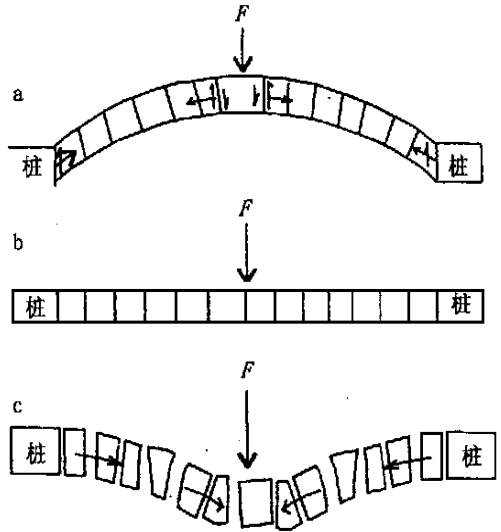


图 2 土拱变形破坏示意图

Fig. 2 The sketch of soil arch deformation of failure

由此得出土拱发生破坏的条件是过大的滑坡推力与土拱内部较低的土颗粒抗剪强度耦和作用的结果。要预防土拱过大变形与破坏,首先考虑的是准确确定最大桩间距。即在滑坡推力、桩间土体抗剪特征和抗滑桩基本尺寸已知的条件下,用以下模型

估计最大桩间距。其次是考虑用工程的方法改变抗滑桩间土体的结构和提高抗剪性能。

### 3.2 最大桩间距估算模型

#### 1. 基本假定

(1)土拱类似桥隧拱圈的特性,将滑坡推力传递到两侧抗滑桩上。假设传递过程中无能量损耗,并以正压力方式全部转化为桩侧摩阻力。实为桩侧最大摩阻力(图3)。

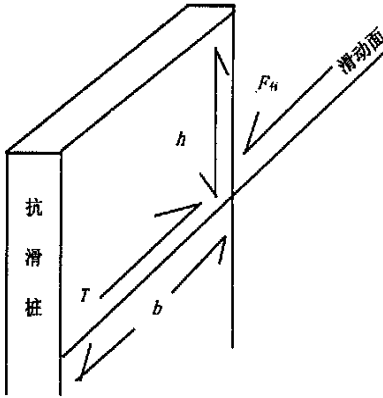


图3 桩侧平衡力学示意图

Fig.3 The sketch of counterbalance system side anti-sliding pile

(2)桩侧摩阻力承担桩间全部滑坡推力。

#### 2. 土拱平衡力系

据上假定,桩侧最大摩阻力  $T$  为平衡力系的一端

$$T = \frac{1}{2} L F_i \operatorname{tg} \phi + cbh$$

平衡力系的另一端有两种约定,一是选桩间全部滑坡推力;二是选滑坡推力克服土拱本身剩余抗滑力后的有效滑坡推力。用前者建立的平衡方程存在滑坡力的分析准确性欠佳的问题;用后者建立的平衡方程就考虑了滑坡力的分析不准确性的问题。所以本文选择了有效滑坡推力为平衡力系另一端。土拱平衡力系为

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} L \{ F_i - [ W_i (\cos \alpha \operatorname{tg} \phi - \sin \alpha) + cb ] \} \\ & = \frac{1}{2} L F_i \operatorname{tg} \phi + cbh \end{aligned}$$

化简上式为

$$L = \frac{2cbh}{F_i - F_i \operatorname{tg} \phi - [ W_i (\cos \alpha \operatorname{tg} \phi - \sin \alpha) + Cb ]} \quad (7)$$

式中  $b$ 、 $h$  为抗滑桩侧滑动面以上宽和高(m),式(7)即为抗滑桩最大桩间距计算模型。

#### 3. 最大桩间距估算模型

从(7)式看出,桩侧面内聚力越大,则桩间距

也大;滑坡单位推力越大,则桩间距反而变小。这与实际情况一致。

据前面(2)式,  $W_i (\cos \alpha \operatorname{tg} \phi - \sin \alpha) + cb$  为土拱本身的剩余抗滑力,用  $R_i$  表示,则(7)式变为

$$L = \frac{2cbh}{F_i (1 - \operatorname{tg} \phi) - R_i} \quad (8)$$

据计算统计分析,滑坡单宽推力  $F_i > 500$  kN,滑动面倾角  $> 5^\circ$ ,滑带土  $C < 10$  kPa,  $\phi < 8^\circ$ ;计算出的剩余抗滑力  $R_i$  很小,在滑坡推力  $F_i$  10%以下。自然界中大多数滑坡满足这个条件,所以在实际估算抗滑桩间最大距离时,可不计土拱本身的剩余抗滑力。此时(8)式变为

$$L = \frac{2cbh}{F_i (1 - \operatorname{tg} \phi)} \quad (9)$$

因不计土拱本身沿滑动面滑移变形的剩余抗滑力,所以算出的最大桩间距偏小。对工程的安全有利。

在实际工作中,设计人员常根据滑坡区地形与环境地质特征先确定桩间距  $L$ ,而后确定抗滑桩的几何尺寸。可按下式计算抗滑桩最小侧面宽

$$b = \frac{L F_i (1 - \operatorname{tg} \phi)}{2ch} \quad (10)$$

#### 4. 实例

四川省某市世寿街滑坡,体积为  $10.32 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,工程布设处滑动面埋深 10 m。滑体组成物质主要为粉质粘性土,土体雨季含水量较高,呈软塑的下限状态。抗剪强度  $C$  值为 28 kPa,  $\phi$  值为  $8^\circ$ 。工程布置处的滑体单宽推力为 300 kN。设计者选用抗滑桩治理,桩的侧面宽  $b$  取为 0.9 m。请计算最大桩间距。

将上述已知参数代入(9)式计算

$$L = \frac{2 \times 28 \times 0.9 \times 10}{300 \times (1 - \operatorname{tg} 8^\circ)} = 1.95 \text{ (m)}$$

计算结果,此滑坡用侧面宽为 0.9 m 的抗滑桩,最大桩间距为 1.95 m,而实际设计用的是 1.8 m。计算值略大于设计使用值,这是合理的。

## 4 问题讨论

#### 4.1 桩间土拱的边界与形态问题

桩间土拱的边界并非清晰可辨,是一个模糊的边界。由于土拱的组成物和结构与前后土体完全相同,所以桩间土拱与前后土体间没有明显的界线。土拱沿滑动方向的厚度,也未见资料报导,笔者认为与抗滑桩侧面宽  $b$  一致。土拱变形前的弧形半径

则与桩间土体的物理力学特性有关。

#### 4.2 桩间土拱的动力学机理问题

与一般桥涵、隧洞的拱圈相比, 桩间土拱的组成、结构复杂多了。所以在滑坡推力作用下, 发生变形的动力学机理也更复杂。但是, 是可以模型试验和计算机仿真技术研究的。

#### 4.3 桩间距 $L$ 与桩侧宽 $b$ 的合理匹配问题

从(9)式看出, 为了节省投资, 获得大的桩间距, 可把抗滑桩做得很大( $b$  也很大)。事实上这种推理是不对的。因为粘性土是松散结构, 受到滑坡推力后会产生明显的压缩变形。若两抗滑桩间的粘性土干硬、密实, 则微小的压缩变形就会传递到两抗滑桩上; 若两抗滑桩间的粘性土很松散, 且含水量高, 微小的压缩变形是传递不到两抗滑桩上。若较大的压缩变形还传递不到两抗滑桩上, 则表明桩间土拱未形成, 桩间土体会产生滑移变形或流动。所以不能无限加大抗滑桩的侧面宽来达到增大桩间距、节省投资的目的。

据多年实践, 可先确定桩间距  $L$ , 而后用(10)式计算匹配最小桩侧宽  $b$ 。若把粘性土按含水量分为流塑、软塑、硬塑和干硬等 4 种类型。雨季为软塑状态的粘性土, 桩间距一般取  $2\text{ m} \sim 4\text{ m}$ ; 硬塑状态的粘性土, 桩间距一般取  $4\text{ m} \sim 6\text{ m}$ ; 干硬状态的粘性土, 桩间距一般取  $6\text{ m} \sim 8\text{ m}$ 。

#### 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, 1981.
- [2] 国家防汛抗旱总指挥部办公室, 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所. 山洪泥石流滑坡灾害及防治[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] 张俤元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [4] 金培杰, 等. 川藏公路前龙段龙胆溪 1 号、2 号滑坡的形成机制分析与工程治理措施[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(3): 88~92.
- [5] 林峰, 黄润秋. 关于滑坡推力计算方法的合理性及改进方法的探讨[J]. 山地学报, 2000, 18(增刊): 69~72.

## Soil Arch Mechanical Character and Suitable Space between One Another Anti-sliding Pile

WANG Cheng-hua<sup>1</sup>, CHEN Yong-bo<sup>2</sup> and LIN Li-xiang<sup>1</sup>

(1. Institute of mountain hazards and environment, Chinese academy of sciences & ministry of water conservancy, Chengdu 610041, China;

2. School of Civil Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031 China)

**Abstract:** Anti-sliding pile has been used for prevention and cure landslide more than 40 year, but the radical theory to decide the max distance of one another pile hasn't been set up to now, and the suitable distance of one another depend mostly on expert's experience to decide in work. The paper start from the principle and the mechanical characteristic of forming soil arch of square pile, and analysis roundly the power and the deformation and of soil arch between two anti-sliding pile, and the instant most distance between two piles when soil arch is been destroyed as well as, also set up the plane model to decide the suitable distance between two piles.

**Key words:** anti-sliding pile; soil arch between one another pile; mechanical character; suitable space distance between two piles