

文章编号: 1008 - 2786 - (2015) 3 - 326 - 05

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000041

# 基于桩间土拱效应的微型桩间距的分析

李志雨, 何晖, 郭智

(西安工业大学建筑工程学院, 陕西 西安 710032)

**摘 要:** 通过 FLAC3D 软件模拟计算和分析陕南勉县的微型桩治理滑坡工程实例, 研究了微型组合抗滑桩在滑坡治理中土拱效应的形成、应力的变化状况, 得出最佳距径比。结果显示: 微型桩在滑坡下滑主动土压力的作用下, 首先在沿滑移方向第 1 排桩桩间形成应力拱效应, 然后随着距径比的增加, 依次在第 2 排、第 3 排桩上形成应力拱效应, 并且前排桩的荷载分担比明显大于后排桩的荷载分担比。当距径比达到一定程度后土体绕过第 1 桩, 形成以第 2 排桩为拱顶, 第 3 排桩为拱脚的应力拱。由模拟的应力云图得知, 距径比  $< 3$  和  $> 9$  时, 没有明显的或者不存在应力土拱效应, 距径比为  $5 \sim 8$  时最为理想。

**关键词:** 微型桩; 土拱效应; 距径比; 数值模拟

**中图分类号:** TU43

**文献标志码:** A

微型桩是指直径  $< 300$  mm, 长细比较大的桩, 这种桩具有施工方便、布置灵活的特点。随着滑坡灾害各项研究的发展与深入, 防治工程措施也在完善已有的基础上向轻型化、小型化方向发展。微型桩便是符合这发展特点的支挡结构。“5·12”汶川地震后, 由于受地震的影响, 在西部山区形成了许多潜在的中小型滑坡, 微型桩在此便被广泛推广并使用。在陕南许多中小型滑坡、基坑、公路及铁路路堤边坡支护、挡土结构等抗滑工程中微型桩得到了广泛的应用, 并取得了良好的工程治理效果。几年过去了, 这些工程无一出现安全问题, 防患于未然, 有效地减轻地质灾害的威胁, 保证了广大山区人民的财产及生命安全。

微型桩就是抗弯刚度较小的微型化的抗滑桩, 目前微型桩的计算与设计方法采用的都是设计抗滑桩的力学模型, 对于微型桩的群桩效应中“土拱效应”考虑较少。虽然抗滑桩理论研究及实践应用都非常成熟, 但其机理用于轻、快、方便的微型桩治理紧急滑坡中不一定很适合<sup>[1]</sup>。鉴于目前关于微型组合抗滑桩治理滑坡的作用机理没有成熟的理论, 本文在开展数值模拟基础上分析不同的距径比下微

型组合抗滑桩桩间土拱特性, 得出比较合理的距径比, 并通过实际工程例子验证, 为微型组合抗滑桩设计寻求最佳距径比提供一定的依据。

## 1 土拱效应的分析

在边坡工程中, 当桩之间的土体受到滑坡推力的作用, 顺坡方向蠕动, 在微型桩阻碍坡体位移而使自身产生变形的同时, 相邻桩之间的土体有向坡体外侧移动的趋势, 土体横向挤压。由于抗滑桩的横向位移小于坡体的横向位移, 造成桩前(受力面)局部范围内的土体不断挤压桩体而产生不均匀的土压力, 并将推力大部分传递到两侧的桩上, 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<sup>[2]</sup>。这表明两桩之间土拱已形成。通过微型桩在滑坡应急治理中的承载机理的研究, 认为桩间距是微型桩设计的重要指标<sup>[3]</sup>, 桩间距过大, 桩间土体就不会出现有效的土拱效应, 土体会发生绕桩运动或从桩间溜滑, 这样微型桩就起不到预期的拦挡作用, 但是桩间距过小时, 会造成工程造价方面的浪费, 同样也不可取。

收稿日期(Received date): 2013-10-30; 改回日期(Accepted): 2014-01-18。

作者简介(Biography): 李志雨(1988-) 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程设计与施工。[Li Zhiyu(1988-), Male, Current Master Students, Current research is the design and construction of the geotechnical engineering.] E-mail: lzyminda@163.com

## 2 模型建立及模拟

FLAC3D 可以对连续介质进行大变形分析,能计算非线性本构关系,可模拟多种不同力学特性的材料,因此非常适合于模拟滑坡体变形及破坏的过程<sup>[4]</sup>。本文中土体采用的强度准则为摩尔-库仑准则,桩的本构关系为各向同性弹性模型准则,变形模式采用大应变变形模式<sup>[5]</sup>。本次模型的建立依据为陕南某一滑坡,通过适当简化而来。计算时只考虑二级坡的下滑。

### 2.1 计算域的确定

本次模拟模型的尺寸:坡体高 17 m,长 30 m,宽 8 m,土层分两层,为了真实地展现微型桩在土体中作用而形成土工效应的目的,两层土的参数不一样,滑体抗剪强度指标  $c = 10 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 25^\circ$ ,滑床土体抗剪强度指标  $c = 15 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 35^\circ$ 。模型的前后左右面及底面均是人为边界,且各方向都约束,只有上部面为自由面。桩总长为 9 m,预估锚固端 4 m,采用梅花形布置共有 3 排,桩径为 300 mm,排间距 1.6 m,如图 1 所示,图中灰白圆圈为微型桩,所建整体模型如图 2。

### 2.2 有限元结果分析

通过对不同距径比下的应力云图的分析得出:在主动土压力的作用下,桩前土体被挤压,形成了桩和土体相对位移或相对位移趋势。由于桩体相对土体刚度较大,水平方向位移较小,因此下滑力可以传递给桩体。可以得出桩间土的成拱的效应机制:当土体发生相对于桩的运动或者运动趋势时,土拱效应就会产生<sup>[6]</sup>。由距径比为 3 的主应力云图(图 3)可以分析得出:距径比为 3 时各排桩均没有形成明显的应力拱;整个桩所在区域相当于挡土墙作用形式,从距径比为 5 应力云图(图 4)看出沿顺坡方向

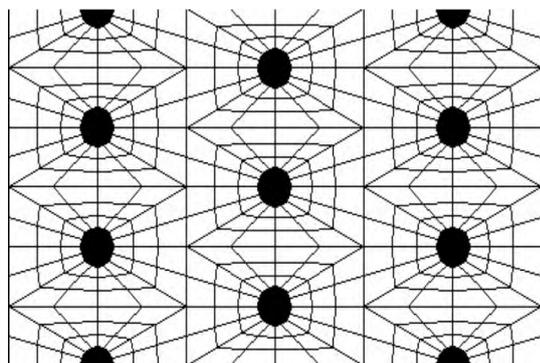


图 1 桩布置截面图

Fig. 1 Section drawing of pile placement

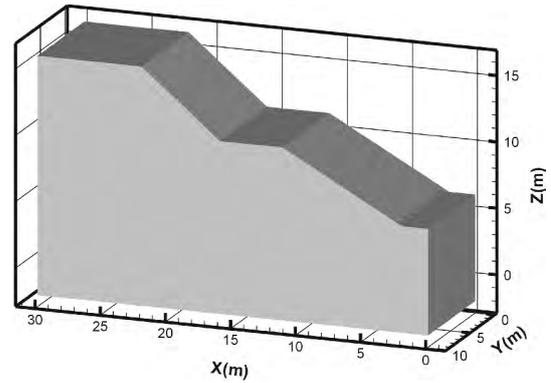


图 2 FLAC 建模模型

Fig. 2 FLAC building model

第一排桩有应力拱形成但几乎处于破坏阶段,第 2、3 排都有明显的应力拱形成,说明此时 3 排桩协同受力,3 排桩都起到抗滑效果,并且第 2、3 排桩后的应力都能趋于平衡和稳定,是最为理想的治理效果。距径比为 6 时(图 5),仅第 3 排桩有明显的应力拱,无应力拱的排桩承担的推力小于有应力拱的排桩。距径比为 7(图 6)与 8(图 7)时形成中间排桩为拱顶,第 3 排桩为拱脚的应力拱,说明梅花形布置的群桩更容易形成整体受力的群桩效应<sup>[8]</sup>。距径比为 9 时(图 8),第 3 排桩承担的推力大,有应力集中的现象,但是 3 排桩没有形成明显的应力拱,桩的抗下滑力作用减弱,桩间土体滑溜,达不到治理滑坡的效果。

## 3 计算分析及实例

### 3.1 计算分析

由于边坡表面倾斜,在岩土体自重及其他外力作用下,整个岩土体都有从高处向低处滑动的趋势。目前计算土体下滑推力,普遍采用不平衡推力传递法计算,本次计算所得下滑力仅由桩前斜坡(二级坡)土体产生,一级坡不在计算范围内,且不考虑空隙水压,计算公式见式(1)。桩间距的计算以桩间土拱的有效形成为前提,同时土拱各截面不破坏且其应力状态应满足屈服强度条件,目前主要采用式(2)计算,此方法符合摩尔-库仑准则且简单易行,仅需知道滑动土的抗剪强度指标及滑面倾角

$$P_i = P_{i-1} \times \Psi + F_{st} \times T_i - R_i \quad (1)$$

式中  $P_i$ 、 $P_{i-1}$  分别为第  $i$  块段、第  $i-1$  块段滑体的剩余下滑力(kN/m);  $F_{st}$  为抗滑安全系数;  $T_i$  为下滑力;  $R_i$  为抗滑力;  $\Psi_i$  为推力传递系数;

$$kq \sin \beta \left( 4 \frac{f}{l} - \tan \beta \right) = 8 \frac{f}{l} cr \frac{1}{l} + q \sin \beta \left( 4 \frac{f}{l} + 1 \right) \tan \varphi$$

(2)

式中  $k$  为自取安全系数  $q$  为单位高度土拱压力  $\beta$  通过滑面倾角求得  $c$  为粘聚力  $r$  为桩半径  $\frac{f}{l} = \frac{\tan(\beta + \theta)}{4}$ ;

本次微型组合抗滑桩直径为 300 mm 桩长为 9 m 锚固端长度 4 m 桩所在区域滑面的倾角通过无

桩时模拟得到滑移趋势倾角大概为  $21^\circ$  ,滑体抗剪强度指标  $c = 10 \text{ kPa}$ 、 $\varphi = 25^\circ$  ,经用不平衡推力传递系数法算得桩前滑坡推力为 67.6 kN ,分布压力  $q$  为滑坡推力除以滑面高度<sup>[9]</sup> ,取安全系数为 1.2 ,代入式(2) 可计算出桩间距为 1.27 m ,接近 5 倍的桩径 ,当采用 3 排梅花形布置的微型桩时 ,可将桩间距适当增加 ,因此模拟得到的结果是合理的。

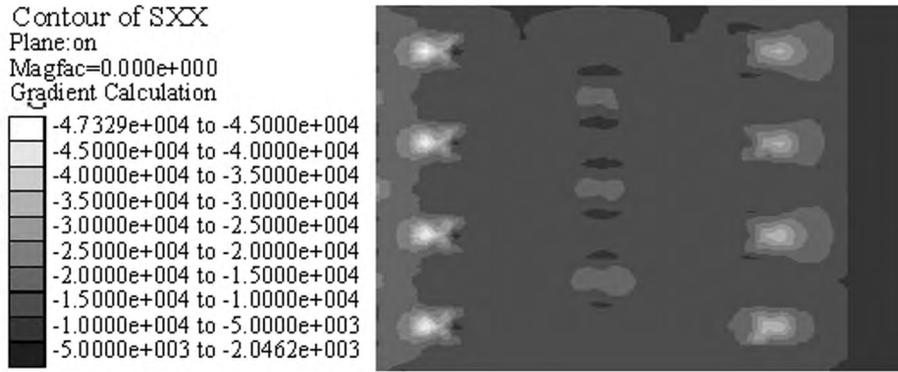


图 3 距径比为 3 的主应力

Fig. 3 Contour of standard stress for ratio of distance and diameter for 3

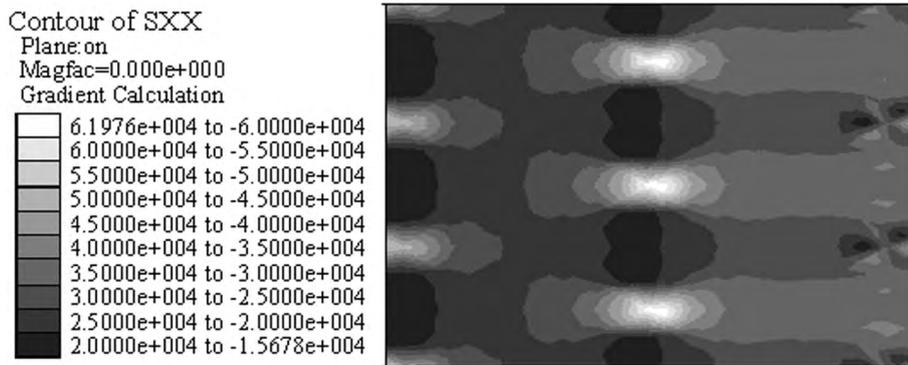


图 4 距径比为 5 的主应力

Fig. 4 Contour of standard stress for ratio of distance and diameter for 5

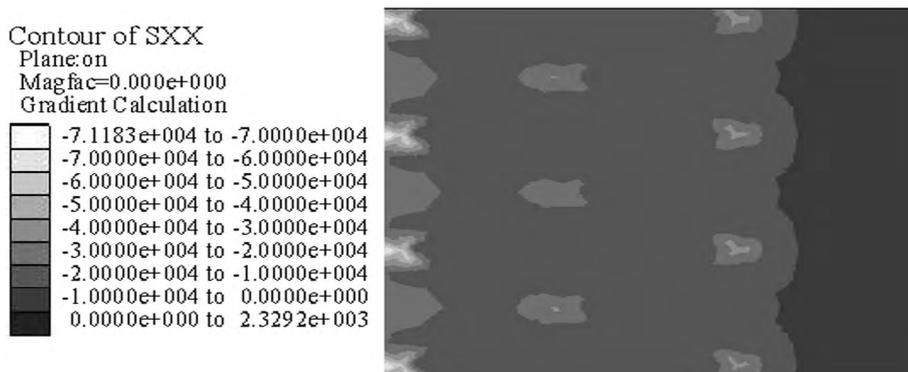


图 5 距径比为 6 的主应力

Fig. 5 Contour of standard stress for ratio of distance and diameter for 6

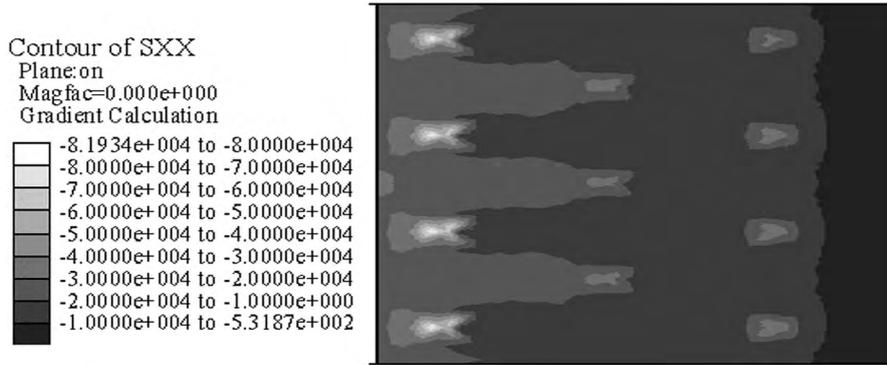


图 6 距径比为 7 的主应力

Fig. 6 Contour of standard stress for ratio of distance and diameter for 7

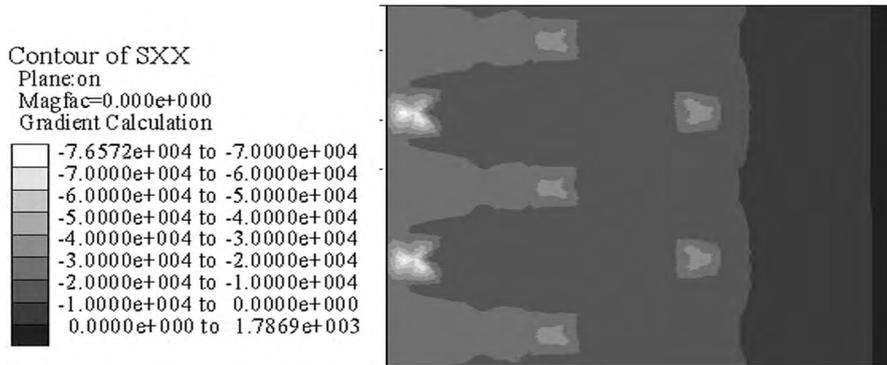


图 7 距径比为 8 的主应力

Fig. 7 Contour of standard stress for ratio of distance and diameter for 8

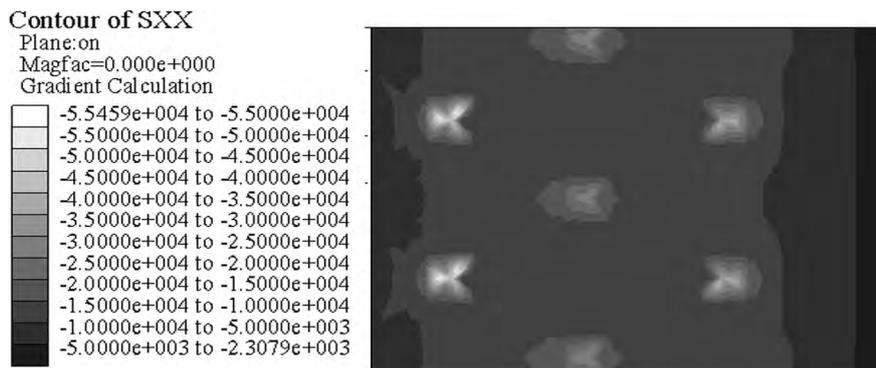


图 8 距径比为 9 的主应力

Fig. 8 Contour of standard stress for ratio of distance and diameter for 9

### 3.2 工程实例

微型桩抗滑结构具有诸多施工优势,非常适合边坡地质条件很复杂的陕南山区的中小规模的滑坡治理工程,本次数值计算模型是陕西省勉县金泉寺滑坡的简化型。此工程滑体土方约  $4 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,属于小型滑坡,探孔测斜结果显示,中上部滑体变形深度达到土深 4 m 多,在此工程中采用的都是三排直径为 200 mm 的梅花形布置的微型桩,桩长为 9 m,取得距径比都是 5。根据工程具体情况将微型桩设置

在坡面、坡中平台处,工程应用效果良好,多年来此边坡一直非常稳定,达到了防治效果。所以对于多排微型桩,桩间距为 5 倍的桩径是合理的且较保守的。

### 4 结论

经过多次数值模拟计算分析得出按梅花形排列的 3 排微型桩的应力图,根据计算结果以及作者所参与的陕西省勉县地区微型桩治理滑坡的工程实

例,可以得出以下结论:

1. 微型组合抗滑桩在一定的荷载作用下,首先在沿受力方向第1排桩间形成土拱效应,然后随着距径比的增大,依次会在第2排、第3排桩上形成土拱效应。

2. 当土体绕过桩后,没有形成应力拱,桩承受的下滑力骤减,桩间形成应力拱的桩承受更大的下滑力。

3. 3排梅花形桩布置,距径比增大到一定程度时,形成以第3排为拱脚第2排桩为拱顶的梅花桩特有的应力拱,采用多排桩时,相对于横纵均对齐布置的桩,梅花形错开布置的桩的治理的效果可能更好些。

4. 采用多排桩治理紧急滑坡时,距径比太小无土拱效应相当于挡土墙效果,造价太高,距径比太大亦无土拱效应且桩间土绕桩滑溜,达不到治理效果,两种情况都不可取,其中距径比为5~8最为理想。

#### 参考文献(References)

- [1] Zhu Baolong, Chen Qiang, Wu Xiyong. Grouting miniature pile group supporting system mechanism and engineering application [M]. Beijing: Science Press, 2009. [朱宝龙, 陈强, 巫锡勇. 注浆微型桩群支护体系作用机理及其工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [2] Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Engineering geology analysis principle (Second edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. [张倬元, 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.]
- [3] Zhou Depei, Xiao Shiguo, Xia Xiong. Discussion on rational spacing between adjacent anti-slide piles in some cutting slope projects [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 132 - 135 [周德培, 肖世国, 夏雄. 边坡工程中抗滑桩合理桩间距的探讨 [J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 132 - 135]
- [4] Chen Yumin, Xu Dingping. FLAC/FLAC3D foundation and practical engineering [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008 [陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.]
- [5] He Hui, Li Zhiyu. A stability analysis of a mining potential landslide base on FLAC3D Software [J]. Journal of Gansu Sciences, 2013, 25(3): 32 - 35 [何晖, 李志雨. 基于 FLAC3D 的矿区潜在滑坡稳定性分析探究 [J]. 甘肃科学学报, 2013, 25(3): 32 - 35]
- [6] Wang Chenghua, Chen Yongbo, Lin Lixiang. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile [J]. Mountain Research, 2001, 19(6): 556 - 559 [王成华, 陈永波, 林立相. 抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析 [J]. 山地学报, 2001, 19(6): 556 - 559]
- [7] Shi Shengwei, Liang Jiong. Based on soil arching effect study of the miniature anti-slide's ratio of distance and diameter [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(Suppl.): 755 - 760 [石胜伟, 梁炯. 基于土拱效应微型组合抗滑桩距径比的研究 [J]. 工程地质学报, 2012, 20(增刊): 755 - 760]
- [8] Huihe, Yanbing Liu. Analysis of numerical simulation of micro piles reinforcing shallow landslide [J]. Advanced Materials Research, 2012(3): 263 - 266
- [9] Zhou Yinghua, Zhou Depei, Hong Jun. Geometrically mechanical characters of soil arch between two adjacent laterally loaded piles and determination of suitable pile spacing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 455 - 357 [周应华, 周德培, 冯君. 推力桩桩间土拱几何力学特性及桩间距的确定 [J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 455 - 357]

## The Micro Pile Analysis for Interval Based on the Soil Arch Effect

LI Zhiyu, HE Hui, GUO Zhi

(Architecture College of Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Through FLAC3D simulation calculation and the analysis of micro pile treating landslide engineering example in Mianxian county of Shanxi, China. This paper studies the micro combination anti-slide pile is condition of the stress arch effect in the formation and in the change of horizontal stress, get the best distance and diameter ratio. Results show that the micro piles in landslide falling under positive soil pressure. Soil arching effect is formed along the slide direction in the first row of between piles. Then as the increase of ratio of distance and diameter, on the second row and the third row the soil arch effect is formed, the load sharing ratio in the front row were significantly greater than the back one. After the pitch diameter ratio reaches a certain degree, the soil around the first and second row piles, it is formed vault in the second row piles and the arch foot in the third row piles for the stress. By simulating the stress nephogram, distance and diameter ratio is less than 3 and is more than 9, the soil arch effect is not clear or there is no existent, it is ideal distance and diameter ratio is ratio of 5 to 8.

**Key words:** Micro Piles; Soil arching effect; Ratio of distance and diameter; Numerical simulation