

# 基于颗粒流的抗滑桩土拱效应研究

向先超<sup>1,2</sup>, 张 华<sup>1</sup>, 蒋国盛<sup>2</sup>, 涂鹏飞<sup>1</sup>

(1. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 抗滑桩土拱效应的研究目前主要是建立在连续介质理论基础上, 难以考虑土体颗粒粒度组成等重要因素, 因此有必要进一步深入揭示土体这种非连续、非均匀散粒体的成拱机理。利用颗粒流方法, 研究了抗滑桩截面大小、间距、桩土相对变形速度和土体颗粒粒度组成对土拱效应的形成、发展、破坏和再形成过程的影响, 并揭示了这些因素对土拱的极限承载能力、残余承载能力和桩土荷载分担比的影响规律。结果表明: 以上因素对抗滑桩土拱效应影响显著。土拱的极限承载能力随桩间距与桩宽的相对比例增大而减小, 随桩土间的相对运动速度和土颗粒的分布宽度增大而增大; 残余承载能力和桩体荷载分担比随桩间距与桩宽的相对比例和土颗粒的分布宽度增大而减小, 随桩土间的相对运动速度增大而增大。因此在抗滑桩设计及布桩位置选择时, 应尽可能考虑相关影响因素, 以优化设计, 节省投资。

**关键词:** 抗滑桩; 土拱效应; 颗粒流; 土粒粒度

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)03-0386-06

**作者简介:** 向先超(1976-), 男, 湖北利川人, 博士, 副教授, 从事岩土加固技术及机理研究。E-mail: [xiangxc1224@yahoo.com.cn](mailto:xiangxc1224@yahoo.com.cn)。

## Soil arching effect of anti-slide piles based on particle flow method

XIANG Xian-chao<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup>, JIANG Guo-sheng<sup>2</sup>, TU Peng-fei<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The studies on soil arching effect of anti-slide piles are mainly based on the continuous medium theory at present. It is difficult to consider the distribution of soil particle size and other important factors. It is necessary to further reveal the arching mechanism of soil which is non-continuous and non-uniform material. Particle flow code (PFC) is used to study the effects of anti-slide pile size, spacing, pile-soil relative deformation rate and soil particle size distribution on the formation, development, destruction and re-formation process of the soil arch. The effects of the above factors on the maximum bearing capacity, residual bearing capacity of the soil arch and the pile-soil load share ratio are revealed. The results show that the effects of these factors are significant. The maximum bearing capacity of the soil arch decreases with the increase of the ratio of the pile spacing to the width and increases with the increase of pile-soil relative deformation velocity and soil particle distribution width. The residual bearing capacity and the pile load distribution ratio decrease with the increase of the relative ratio of the pile spacing to the width and soil particle distribution width, and increase with the increase of pile-soil relative deformation velocity. Therefore, the design and location of anti-slide piles should consider relevant factors as many as possible to optimize the design and save investment.

**Key words:** anti-slide pile; soil arching effect; particle flow; soil particle size

## 0 引言

滑坡是一种严重的地质灾害, 给人类的生命财产带来了重大威胁和损失。我国投入了大量的人力、物力和财力来进行这方面的研究和治理, 抗滑桩由于桩身截面大, 抗滑能力强, 成为其中的一种重要治理措施。其抗滑机理体现于桩、滑体、滑床三者间相互协调的工作过程中<sup>[1]</sup>。当抗滑桩开始发生作用时, 桩周土体将产生不均匀位移, 致使土颗粒互相“楔紧”, 在

一定范围的土层中产生“拱效应”。土拱是先有力后有拱, 由土体自发形成, 结构力学上称其为“合理拱轴线”<sup>[2]</sup>。

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20090461003); 湖北省自然科学基金计划项目(2008CDB052); 湖北省教育厅自然科学研究项目(Q20081302); 三峡库区地质灾害教育部重点实验室主任基金项目(2008ZRJ03)

收稿日期: 2009-11-17

Roberts<sup>[3]</sup>于1884年发现了“粮仓效应”:粮仓底面所承受的力在粮食堆积高到一定程度后达到最大值并保持不变。Terzaghi<sup>[4]</sup>1943年通过活动门试验,证实了土力学领域土拱效应的存在。近年来,许多学者运用数值计算<sup>[5-9]</sup>以及模型试验方法<sup>[10-12]</sup>对抗滑桩的加固机理和土拱效应进行了研究。这些研究结果表明,桩间土拱效应影响因素较多,主要有桩间距、土体内摩擦角、黏聚力和孔隙比等。

虽然抗滑桩土拱效应的研究取得了较大进展,但仍存在着很多不足和有待改进的地方。目前关于土拱效应的研究主要是建立在连续均匀介质上的,而土体实质上是一种非连续、非均匀的散粒体,特别是物质组成复杂的滑坡,如堆积层滑坡体,颗粒粒径分布范围宽。现有的研究很少考虑滑坡体物质组成,特别是碎、块石等较大颗粒的影响。因此,基于连续介质基础上的研究结果难以准确描述抗滑桩土拱效应的形成机理和变化过程,必然导致该类滑坡中抗滑桩工程的设计有一定的盲目性。

由于滑坡体材料的非均匀和非连续性,进行大型室内外土工试验和模型试验耗费高,试验信息的准确采集难度大,除了可以进行少数验证性试验外,难以进行大量的规律性试验。而理论研究也存在一些困难,许多滑坡(如堆积层滑坡)物质组成复杂,颗粒粒度分布范围宽,短时间内还难以建立应用性强的本构模型。近年来,离散元方法在岩土力学模拟试验中逐渐得到了广泛的应用<sup>[13-15]</sup>。该方法是基于颗粒的细观力学特征建立的,没有采用连续介质力学研究手段时必须面临的本构研究困难,使得对一些非线性、大变形等复杂问题的研究成为可能<sup>[16]</sup>。本文采用基于离散元理论的颗粒流方法对抗滑桩土拱效应进行研究。

## 1 分析模型

虽然抗滑桩土拱效应具有三维空间特征,但为了简化计算,提高分析效率,将抗滑桩及周边土体的受力简化为二维问题<sup>[17-18]</sup>。选取地表以下一定深度的单位厚度土层作为分析对象,将研究问题简化为二维平面应变模型。假定土层的位移在水平方向上,桩体水平位移为零,忽略桩的弹性侧向变形,将桩视为完全刚性,分析模型如图1。

采用PFC<sup>2D</sup>程序建立计算模型,由于对称性,取两根桩及其中心范围内的土体为研究对象,为了提高颗粒流分析效率,模型对实际工程问题尺寸进行一定比例缩减。模型中抗滑桩为边长0.1 m的方桩,桩间距0.3 m,计算范围沿滑动方向从桩中心向后延伸0.5 m,向前延伸0.1 m。桩身采用“广义墙”模拟,左右边界用光滑墙模拟。为了获得抗滑桩土拱的形成及发

展全过程,借鉴土体抗剪强度直剪试验原理,取消模型前部边界的位移约束,形成临空面,模型后部用一缓慢匀速向前移动的光滑加载墙模拟桩后土体的蠕滑变形。

滑坡土体是一种非均匀非连续的散粒体,颗粒粒径分布范围宽,为了便于和以前基于连续介质的数值计算结果进行比较,首先采用粒径为3 mm单一的圆形颗粒进行模拟,颗粒粒度的组成对土拱效应的影响后面再进行分析。根据颗粒流双轴试验与土体的室内土工试验参数对比分析,确定土体细观物理力学参数,颗粒密度2600 kg/m<sup>3</sup>,剪切刚度 $5 \times 10^7$  N/m,法向刚度 $5 \times 10^7$  N/m,摩擦系数0.8。抗滑桩剪切刚度 $6 \times 10^7$  N/m,法向刚度 $6 \times 10^7$  N/m,摩擦系数0.2。

每隔50 mm用另一种颜色将土体颗粒标出一条线,以利于观察土体位移情况。颗粒流计算模型如图2。

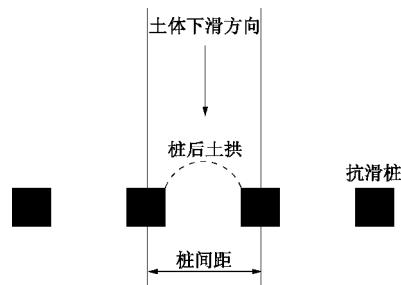


图1 土拱效应分析模型

Fig. 1 Model for soil arching effect

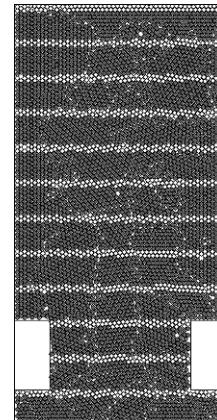


图2 颗粒流模型

Fig. 2 PFC model

## 2 土拱效应的形成和发展变化过程分析

桩后加载墙以5 mm/s的速度匀速向前移动,每移动 $3 \times 10^{-4}$  mm进行一次运算,并记录加载墙的荷载、桩端荷载、桩侧摩阻力随加载墙位移的变化情况。图3为桩两侧摩阻力与加载墙位移之间的关系曲线。图4为桩两端荷载、土拱荷载、加载墙施加荷载与加载墙位移之间的关系曲线。从两图的比较可以发现,在本模型中,桩侧承担荷载远远小于桩端承担的荷载,桩

两侧侧摩阻力在土体蠕滑过程中,出现较大的起伏交替变化。

图4、图5和图6揭示了土拱的形成及发展过程。当加载墙开始向前移动时,应力逐渐传递到加载墙前面的土体和抗滑桩上。从加载墙位移为1.0 mm时的土体颗粒速度矢量图可以发现(见图5),在抗滑桩周围,土体颗粒移动速度大小和方向出现较大变化,导致抗滑桩附近应力方向发生偏转,土颗粒互相“楔紧”。当加载墙位移达到1.1 mm时,桩后土体形成比较明显的土拱(见图6(a)),图中黑线表示土颗粒间的接触力,线宽表示接触力的相对大小。

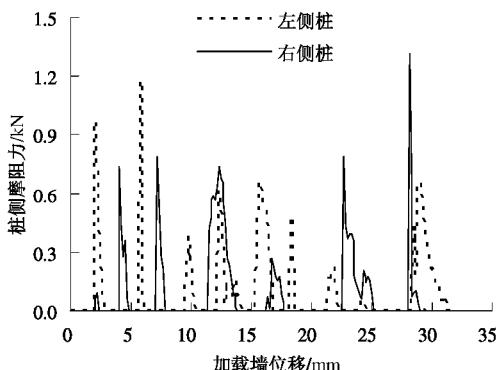


图3 桩侧摩阻力随加载墙位移的变化曲线

Fig. 3 Relationship between lateral friction of piles and displacement of loading walls

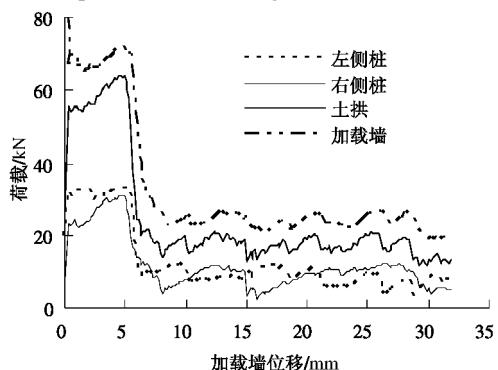


图4 抗滑桩、土拱和加载墙荷载随加载墙位移的变化曲线

Fig. 4 Relationship between loads of piles, soil arch, loading walls and displacement of loading walls

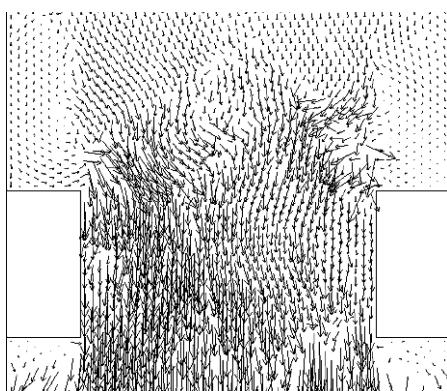


图5 土体颗粒速度矢量图( $d=1.0$  mm)

Fig. 5 Velocity vectors of soil particles ( $d=1.0$  mm)

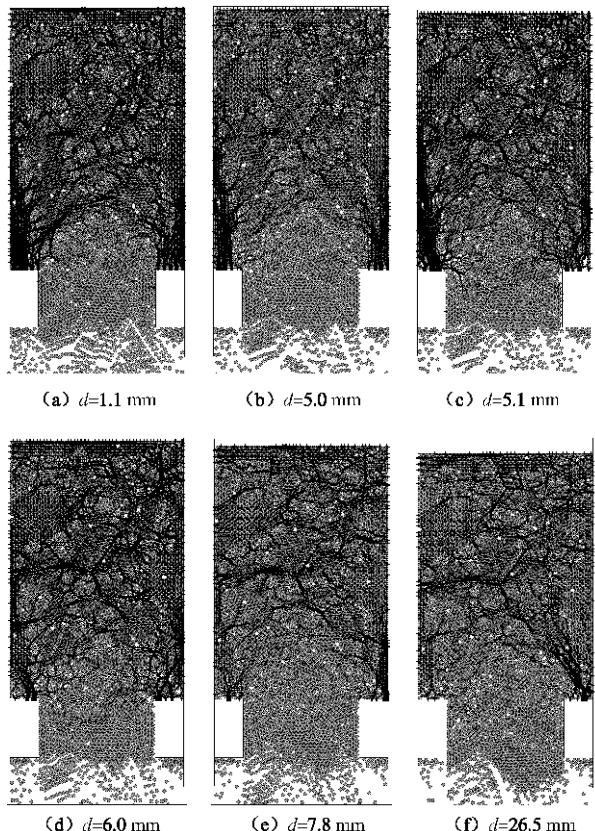


图6 土拱的形成和发展变化过程

Fig. 6 Formation and development process of soil arch

随着加载墙位移增加,桩体承担荷载增大,土拱效应逐渐增强。当加载墙位移为5.0 mm时土拱效应达到最大,此时为土拱承担的极限荷载(见图6(b))。之后随着加载墙位移进一步增大,土拱右拱脚开始破坏(见图6(c)),荷载向左拱脚转移,很快左拱脚也开始破坏,最终导致土拱破坏(见图6(d)),桩体承担荷载迅速减小。当加载墙位移达到7.8 mm时,土拱又再一次形成(见图6(e)),但承担荷载比极限荷载小很多,形成残余荷载。随着加载墙位移进一步增加,出现一个拱脚应力明显增大,另一个拱脚处应力急剧减下的情况,由于模型的对称性,可以推断土体中形成了跨桩拱,左侧桩基本失去了抗滑作用,右侧桩和左侧桩左边的另一个桩形成了土拱效应(见图6(g)),但这个土拱稳定一段时间后随着荷载增大而破坏。之后随着加载墙位移增加,土拱处于破坏、形成、再破坏、再形成的协调变化过程之中,残余荷载虽有波动,但变化不大。

通过分析可以发现,土体作为一种散粒体材料,土拱破坏是由一个拱脚先破坏,荷载转移到另一拱脚,另一拱脚由于荷载增大,也很快破坏,导致土拱最终破坏。土拱破坏后,土体内部应力经过短时调整后,又逐渐形成土拱(在一定的变形和桩间距下,部分桩可能失效,形成跨桩拱),之后随着土体变形的增大,

土拱不断调整变化, 但仍具有一定的荷载承担能力。

### 3 抗滑桩土拱效应的影响因素分析

抗滑桩土拱效应的影响因素很多, 目前的研究主要集中在桩间距、土体内摩擦角、黏聚力和孔隙比等方面。但从土拱的形成机理来看, 土拱效应是由桩、土的性质和桩、土间的相对变形情况这几方面的综合影响决定的。以前的研究很少考虑桩土体间的相对变形速度和土体颗粒组成情况的影响。鉴于有的影响因素已经分析较多, 本文将主要从桩间距与桩宽的的相对大小、桩土相对变形速度、土粒粒度组成3个方面分析抗滑桩的土拱效应。

#### 3.1 桩间距与桩宽相对大小对土拱效应的影响

为了排除其他影响因素, 保持整体模型计算范围大小和荷载加载方式不变。调整抗滑桩边长, 则桩间净距也相应改变, 用 $n_b$ 表示桩间净距和桩宽之比, 分别对 $n_b$ 为1至7的7组情况进行了计算分析。图7为其中4组情况下土拱荷载随加载墙位移的变化曲线, 土拱的极限承载能力和残余承载能力均随桩间净距和桩宽之比增大而减小(如图8), 并且桩间净距和桩宽之比越大, 土拱达到极限承载能力后, 持续时间越短。同时, 桩体的荷载分担比也随桩间净距和桩宽之比增大而减小, 如图9。

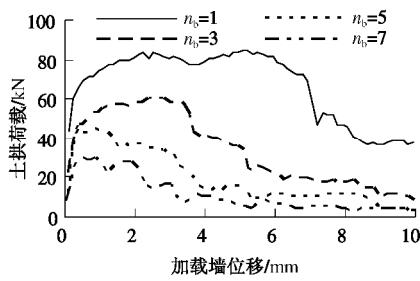


图7 土拱荷载随加载墙位移的变化(不同桩间净距和桩宽之比)

Fig. 7 Relationship between load of soil arch and displacement of loading walls (with different  $n_b$ )

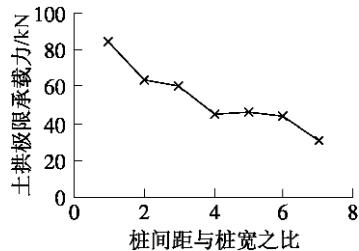


图8 土拱极限承载力随桩间净距与桩宽之比的变化

Fig. 8 Variation of maximum loads of soil arch with different  $n_b$

#### 3.2 桩土相对变形速度对土拱效应的影响

土拱效应的产生机理在于桩后土体的不均匀位

移, 致使土体压缩, 并互相“楔紧”, 进而产生“拱效应”。显然土拱的形成情况受桩土间的相对变形速度影响, 通过调整加载墙速度来研究土体不同变形速度状态下土拱效应的变化, 用 $v$ 表示桩土间的相对位移速度。分别计算了加载墙速度为0.5, 1, 2, 5, 10和20 mm/s几种情况下的土拱效应。图10为其中4组情况下土拱荷载随加载墙位移的变化曲线, 可以发现土拱的极限承载能力和残余承载能力均随加载墙移动速度的增大而增大(图11), 并且加载墙速度越大, 土拱荷载在极限承载能力附近持续时间越长。桩体的荷载分担比随加载墙移动速度增大变化不大, 如图12。这是由于桩土相对变形速度对桩周土体颗粒移动速度和方向影响较大, 进而改变了桩后土拱形成区域的大小、形状和土拱的承载能力。

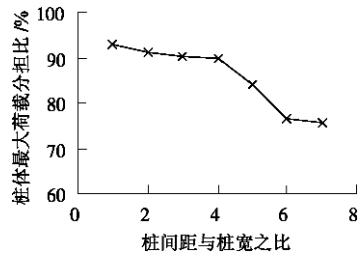


图9 土拱荷载随桩间净距与桩宽之比的变化

Fig. 9 Variation of maximum load sharing ratios of piles with different  $n_b$

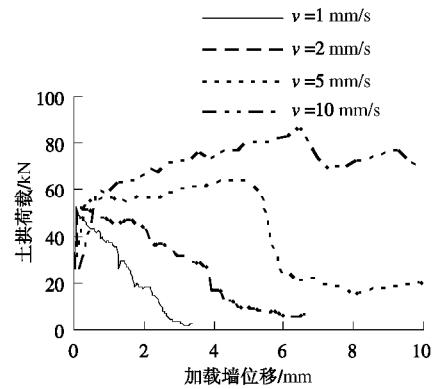


图10 土拱荷载随加载墙位移的变化(不同桩土相对变形速度)

Fig. 10 Relationship between load of soil arch and displacement of loading walls (with different  $v$ )

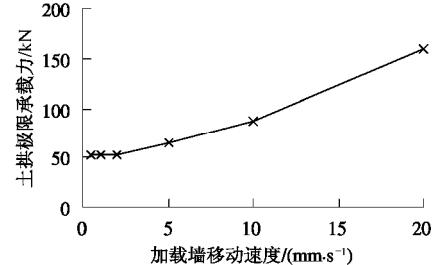


图11 土拱极限承载力随桩土相对变形速度的变化

Fig. 11 Variation of maximum loads of soil arch with different  $v$

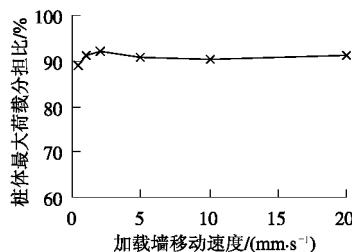


图 12 桩体最大荷载分担比随桩土相对变形速度的变化

Fig. 12 Variation of maximum load sharing ratios of piles with different  $v$

### 3.3 颗粒粒度组成对土拱效应的影响

不同类型的土体，颗粒粒度分布范围差异很大，以三峡库区库岸边坡表层存在的大量堆积层滑坡为例，土体主要是第四系松散堆积体，包括残坡积物、崩坡积物和冲洪积物，物质成份以土夹碎石或碎块石、碎石或碎块石夹土等土石混合物为主，含石量在同一滑坡体的不同位置差异也很大，一般在 30%~70% 之间。因此，如果布桩位置不同，则抗滑桩附近的土体颗粒粒度组成也不同。

保持整体计算模型大小、荷载加载方式和颗粒的平均粒径相同，调整颗粒最大粒径与最小粒径的比值，则土体的不均匀系数  $c_u$  随之改变。最大颗粒粒径和最小颗粒粒径之间颗粒粒径均匀分布，用  $n_r$  表示最大颗粒粒径和最小颗粒粒径之比，分别对  $n_r$  为 1, 2, 3, 4, 5 和 11 的 6 组情况进行了计算分析。图 13 为其中 3 组情况下土拱荷载随加载墙位移的变化曲线，土拱的极限承载能力随  $n_r$  增大而增大（如图 14），残余极限

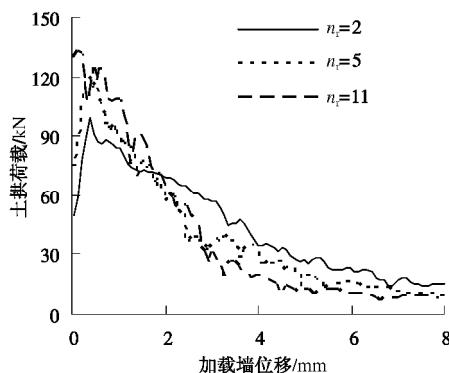


图 13 土拱荷载随加载墙位移的变化（不同颗粒粒度组成）

Fig. 13 Relationship between load of soil arch and displacement of loading walls (with different  $n_r$ )

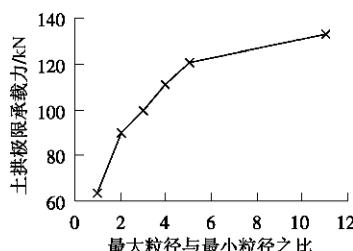


图 14 土拱极限承载力随颗粒粒度组成的变化

Fig. 14 Variation of maximum loads of soil arch with different  $n_r$

承载能力均随  $n_r$  增大而减小。土体颗粒粒度分布范围越宽，土拱成拱过程中荷载起伏变化越大，表明土拱的调整变化越剧烈，达到极限承载能力后，持续时间越短，下降越快。桩体的荷载分担比也随颗粒粒度分布范围增大而减小，如图 15。

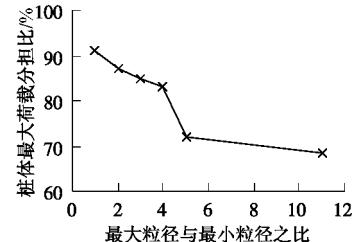


图 15 桩体最大荷载分担比随颗粒粒度组成的变化

Fig. 15 Variation of maximum load sharing ratios of piles with different  $n_r$

## 4 结 论

(1) 在外力作用下，抗滑桩周围土体颗粒移动速度大小和方向出现较大变化，桩附近应力方向发生偏转，土颗粒互相“楔紧”，形成土拱效应。由于土体是一种散粒体材料，随着荷载增大，土拱破坏是由一个拱脚先破坏，荷载转移到另一拱脚，另一拱脚由于荷载增大，也很快破坏。土拱破坏后，土体内部变形经过短时调整后，又逐渐形成土拱。在一定的变形和桩间距下，部分桩可能失效，形成跨桩拱。之后随着土体变形的增大，土拱不断调整变化，但仍具有一定的残余承载能力。

(2) 抗滑桩截面大小、间距、桩土相对变形速度和土体颗粒粒度组成对土拱效应的形成、发展、破坏和再形成过程影响较大。土拱的极限承载能力随桩间距与桩宽的相对比例增大而减小，随桩土间的相对运动速度和土颗粒的分布宽度增大而增大；残余承载能力和桩体荷载分担比随桩间距与桩宽的相对比例和土颗粒的分布宽度增大而减小，随桩土间的相对运动速度增大而增大。

(3) 在抗滑桩设计及布桩位置选择时，应尽可能考虑滑坡体的变形速度和土体颗粒组成情况，以优化设计，节省投资。

## 参考文献：

- [1] 陈立新, 王士川. 抗滑桩的弹塑性理论分析[J]. 工业建筑, 1997(7): 28~33. (CHEN Li-xin, WANG Shi-chuan. The analysis of elastic plastic design theory of anti slide piles[J]. Industrial Construction, 1997(7): 28~33. (in Chinese))
- [2] 贾海莉, 王成华, 李江洪. 关于土拱效应的几个问题[J]. 西南交通大学学报, 2003, 38(4): 398~402. (JIA Hai-li,

- WANG Cheng-hua, LI Jiang-hong. Discussion on some issues in theory of soil arch[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, **38**(4): 398 - 402. (in Chinese)
- [3] 厚美瑛, 陆坤权. 奇异的颗粒物质[J]. 新材料产业, 2001(2): 26 - 28. (HOU Mei-ying, LU Kun-quan. The strange granular material[J]. Advanced Materials Industry, 2001(2): 26 - 28. (in Chinese))
- [4] KARL T. Theoretical soil mechanics (4th edition)[M]. New York: John wiley & Sons, 1947: 66 - 77.
- [5] NOGAMI T, JONES H W, MOSHER R L. Seismic response analysis of pile-supported structure: assessment of commonly used approximations[C]// Proceedings of 2nd International Conference: Recent Advancements of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 1991: 931 - 940.
- [6] BRANSBY M F, SPRINGMAN S M. 3-D finite element modeling of pile groups adjacent to surcharge loads[J]. Computers and Geotechnics, 1996, **19**(4): 301 - 324.
- [7] HESHAM M, NAGGAR EI, KEVIN J. Bentley, Dynamic analysis laterally loaded piles and dynamic  $p$ - $y$  curves[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**: 1 166 - 1 183.
- [8] 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. (ZHOU De-pei, XIAO Shi-guo, XIA Xiong. Discussion on rational spacing between adjacent anti-slide piles in some cutting slope projects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(1): 132 - 135. (in Chinese))
- [9] 赵明华, 陈炳初, 刘建华. 考虑土拱效应的抗滑桩合理桩间距分析[J]. 中南公路工程, 2006, **31**(2): 1 - 3, 28. (ZHAO Ming-hua, CHEN Bing-chu, LIU Jian-hua. Analysis of the spacing between anti-slide piles considering soil-arch effect[J]. Central South Highway Engineering, 2006, **31**(2): 1 - 3, 28. (in Chinese))
- [10] ITO T, MATSUI T. Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles[J]. Soil and Foundations, 1975, **14**(4): 43 - 59.
- [11] MATSUI T, HONG W P, ITO T. Earth pressure on piles in a row due to lateral soil movements[J]. Soils and Foundations, 1982, **22**(2): 71 - 81.
- [12] 陶志平, 周德培. 用抗滑桩整治滑坡地段隧道变形的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(3): 457 - 460. (TAO Zhi-ping, ZHOU De-pei. Model testing research on controlling tunnel deformation in landslide field with antislide piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(3): 457 - 460. (in Chinese))
- [13] 周 建, 池毓蔚, 池 永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(6): 701 - 704. (ZHOU Jian, CHI Yu-wei, CHI Yong, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(6): 701 - 704. (in Chinese))
- [14] JIANG M J, LEROUEIL S, KONRAD J M. Insight into shear strength functions of unsaturated granulates by DEM analyses[J]. Computers and Geotechnics, 2004, **31**(6): 473 - 489.
- [15] 刘文白, 周 健. 上拔荷载作用下桩的颗粒流数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(4): 516 - 521. (LIU Wen-bai, ZHOU Jian. Numerical simulation of Particle Flow Code for pile under uplifting load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(4): 516 - 521. (in Chinese))
- [16] CUNDALL P A, HART R D. Numerical modeling of discontinua[J]. Engineering Computations, 1992, **9**(2): 101 - 113.
- [17] CHEN Chien-yuan. Numerical analysis of slope stabilization concepts using piles[D]. LOS ANGELES: University of Southern California, 2001.
- [18] LIANG R, ZENG S. Numerical study of soil archingmechanism in drilled shafts for slope stabiliton[J]. Soil and Foundation, 2002, **42**(2) : 83 - 92.