

抗滑桩宽度与桩间距对桩间土拱效应的影响研究

杨明¹, 姚令侃¹, 王广军²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川省交通厅, 四川 成都 610041)

摘要: 抗滑桩宽度对桩间土拱效应的影响直接关系到桩截面尺寸及桩间距设计的合理性。通过离心模型试验, 观察到抗滑桩宽度越大, 桩间土拱稳定性越高。基于离心试验模型, 采用数值模拟方法分析桩间土拱承载能力随桩宽度的变化规律。试验表明在桩间净距保持不变的情况下, 桩间土拱承载能力随桩宽度增加而逐渐增大, 但增长斜率逐渐变缓, 说明随着桩宽度的变大, 桩宽度的增加对桩间土拱承载能力的影响越来越小; 而在桩间净距与桩宽度比值不变的情况下, 桩间土拱承载能力随桩宽度和桩间净距的增加反而降低, 且下降斜率逐渐增大, 说明桩间净距对桩间土拱承载能力起着控制作用, 增加桩宽度对土拱承载能力的贡献远不及增加桩间净距对土拱承载能力的削弱作用。本文研究表明, 桩间土拱承载能力与桩宽度之间存在非线性的关系, 在建立抗滑桩合理桩间距计算模型时应对此予以考虑。

关键词: 抗滑桩宽度; 离心模型试验; 土拱效应; 数值模拟; 合理桩间距

中图分类号: U213.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)10-1477-06

作者简介: 杨明(1976-), 男, 四川资中人, 讲师, 博士研究生, 从事道路与铁道工程灾害防治研究。E-mail: ym6136@home.swjtu.edu.cn。

Study on effect of width and space of anti-slide piles on soil arching between piles

YANG Ming¹, YAO Ling-kan¹, WANG Guang-jun²

(1. School of Civil Eng., Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Provincial Department of Communications of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract: The effect of width of anti-slide piles on soil arching between piles directly related to the rationality of design of the section and the space of piles. By the centrifuge model tests, the phenomenon was observed that the larger the width of piles was, the more stable of the soil arching was. Based on the centrifuge model, the numerical simulation method was adopted to analyze the relationship between the bearing capacity of soil arching and the width of piles. It was indicated that if the space between piles was constant the bearing capacity of soil arching gradually increased with the increase of width of piles, but the increasing velocity gradually became slow. It was illuminated that the effect of the width of piles on the bearing capacity of soil arching vanished with the increasing of pile width. If the ratio between the space and the width of piles was constant, the bearing capacity of soil arching descended when the width and the space of piles increased, and the descending gradient gradually increased. It was indicated that the space between piles acted as the dominator to bearing capacity of soil arching, so the contribution of increasing the width of piles for the bearing capacity of soil arching was far less than the weakening effect due to increasing the space between piles. It was indicated that the relationship between the bearing capacity of soil arching and the width of piles was non-linear, and it should be considered when the numerical model of reasonable pile space was established.

Key words: anti-slide pile width; centrifuge model test; soil arching effect; numerical simulation; reasonable pile space

0 引言

在山区公路及铁路修建中, 由于地质地形条件复杂, 形成大量高边坡高路堤工程, 抗滑桩作为一种支挡结构的应用越来越多。抗滑桩的设计理念是采用非连续结构, 利用土体自身强度形成的拱效应^[1]将桩间土体的下滑推力传递到桩身来达到支挡的目的。在设

计时, 首先考虑桩结构的强度和土体下滑推力平衡, 在此基础上对桩截面尺寸及桩间距进行优化, 达到技术方面可行、经济方面合理的目的。

基金项目: 国家自然科学基金西部重点资助项目(90202007); 《西攀高速公路地质灾害研究与对策》科研项目资助
收稿日期: 2006-09-26

对于桩间土拱效应的机理及影响因素,目前还没有形成统一的认识。桩间土拱的稳定性,直接影响到抗滑桩设计的成败,而在实际设计工作中对于合理桩间距的设计还停留于依靠经验的阶段,没有成熟的理论方法可供指导。桩间土拱属于水平拱,从平面问题的角度考虑,其稳定性与桩间距、滑体强度参数、滑体的剩余下滑力、桩的截面尺寸、桩土摩擦系数等有关。从文献资料检索来看,桩宽度对于桩间土拱稳定性的影响,几乎没有做系统的研究。本文首次通过离心模型试验和数值模拟方法,对桩宽度对桩间土拱稳定性的影响进行系统的研究,对于抗滑桩设计具有一定的理论指导意义。

1 桩截面尺寸对桩间土拱的影响分析

对于桩截面尺寸对桩间土拱的影响,主要存在两种观点:一种观点认为桩间土拱拱脚由桩侧与土体之间的存在的摩擦阻力提供,由此假定拱厚与桩侧宽度相等,并导出极限状态下桩间距与桩侧宽度成正比的关系^[2-9];另一种观点认为桩间土拱拱脚由桩本身强度提供,由此假定拱厚与桩宽度相等,并导出极限状态下桩间距与桩宽度成正比的关系^[10-11]。

对于桩间土拱的拱脚问题,还有第三种观点,即认为桩间土拱拱脚是由桩本身强度和桩侧与土体的摩擦力同时提供的^[12],这种观点可能与实际情况是最相符合的,因为只要桩侧土体发生位移,就应该会产生摩擦阻力,但两者中谁是起主导作用的呢?若考虑极限情况,且不考虑桩本身的强度问题,即:①假定桩侧宽度不变而桩宽度减小到可忽略不计的程度,则此时桩间土拱的拱脚只能由桩侧摩阻力提供,其拱脚即所谓的“摩擦拱脚”^[12],类似与“粮仓现象”谷粒与仓壁之间的摩擦力形成的拱脚;②假定桩宽度不变而桩侧宽度减小到可忽略不计的程度,则此时桩间土拱的拱脚只能由桩本身提供,其拱脚可称之为“直接拱脚”^[12],系支护结构本身发挥其抗弯或抗压性能形成的拱脚。

显而易见,两种拱脚形式在抗滑桩实际应用中都是存在的,那么仅以摩擦拱脚作为计算条件显然是不合理的。根据数值模拟的结果,实际上两种拱脚形式最先发挥作用的应该是直接拱脚,因为土体单元发生不均匀位移产生应力转移从桩后较远距离处就已经开始了,此部分转移的应力是由桩结构本身直接承担的,而真正传递到桩侧并由其摩阻力提供平衡的土压力已经很小^[13]。因此,笔者认为,桩间土拱的应力主要应该是前文所述的“直接拱脚”所承担的。

基于以上观点,本文仅对桩宽度和桩间净距对桩间土拱效应的影响进行研究。

2 桩宽度对桩间土拱稳定性影响的离心模型试验现象

一般的观点认为,桩间土体形成土拱的厚度跟桩的宽度有关系^[12]。显然,若只考虑桩间土体,假定土体强度参数及桩间净距相同,则桩宽度对土拱的影响主要体现为对拱脚的影响。本文采用离心模型对此做了一组对比试验,离心模型由基岩、滑体和抗滑桩组成,试验在长600 mm、宽400 mm、高400 mm的模型箱中一次完成,一侧采用32 mm桩宽,一侧采用16 mm桩宽,桩间净距均为10 cm,模型如图1所示(关于桩间土拱效应离心模型试验的详细情况另文探讨)。

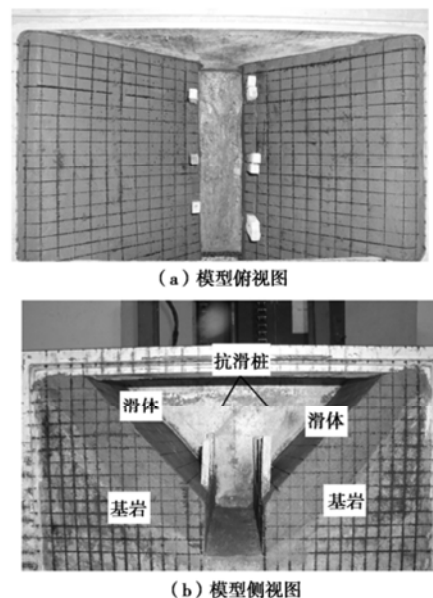


图1 离心模型照片

Fig. 1 Photograph of the centrifuge model

离心加速度加到40g时,试验现象如图2所示。观察试验现象,可以发现,当桩净间距相同时,桩的宽度对土拱的形状及拱矢高度几乎没有太大的影响,但对拱脚的稳定性有一定的影响。16 mm桩的桩后土体出现拉裂缝而32 mm桩的桩后土体仍然保持完整性。由此可定性的判断,桩的宽度越大,对土拱拱脚的稳定性越有利。

3 桩宽对桩间土拱影响数值模拟分析

在离心模型试验中,能够直观的看到桩宽对桩间土拱稳定性的影响,但限于实验条件,只能作出定性的描述,尚无法定量分析。本文采用显式有限差分法模拟桩土的相互作用,并研究桩宽对桩间土拱的影响,

得到桩间土拱承载能力与桩宽度的定量关系曲线。

随着计算机技术的发展,越来越多的学者开始采用数值模拟方法来研究抗滑桩间土拱效应机理^[13-19],但根据文献资料检索,基本上还没有对桩宽度对桩间土拱影响进行系统的分析研究。

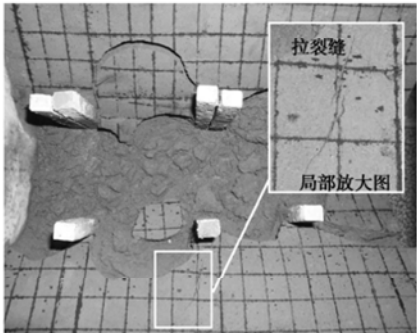


图 2 桩宽对土拱的影响

Fig. 2 Effect of the width of piles on soil arching

3.1 数值模拟模型的建立及试验方案

与离心模型试验相似,数值模拟计算模型由滑体、基岩和抗滑桩组成;其中滑体 7.5 cm 的等厚度,滑面倾角为近 45°,土体黏聚力取为 30 kPa,内摩擦角取为 25°;滑体和滑床之间的交界面设置滑面,其黏聚力为 9 kPa,内摩擦角取为 6°;抗滑桩宽度与桩间距可根据试验方案进行调整,如图 3 所示。

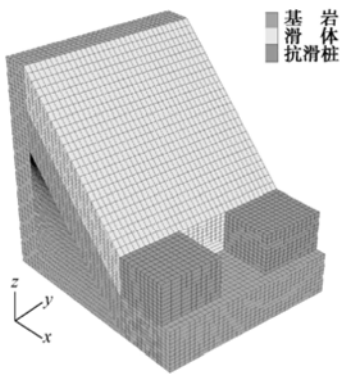


图 3 数值模拟模型示意图

Fig. 3 The sketch of the numerical simulation model

抗滑桩桩间土拱是一种水平拱,可以简化为平面问题进行研究^[13-16]。为便于观察和分析,在滑体中选取与滑面平行的深度为 2 mm 处的平面作为分析研究对象。

为了定量的分析桩宽度对桩间土拱的影响,制定了两类共 12 组试验,第一类试验是桩间净距保持不变,改变桩宽度,第二类试验是保持桩间净距与桩宽度的比例不变,即同时改变桩宽度和桩间净距,方案

如表 1 所示。

表 1 数值模拟试验方案

Table 1 Test schemes of numerical simulation				
试验组号	桩间净距/cm	桩宽度/cm	模型破坏前重力加速度/g	平面土拱承载能力/MPa
第 1 组	10	2	70	1.148
第 2 组	10	3	78	1.318
第 3 组	10	6	86	1.511
第 4 组	10	9	92	1.655
第 5 组	10	12	92	1.666
第 6 组	10	15	92	1.673
第 7 组	10	5	86	1.516
第 8 组	12	6	74	1.507
第 9 组	14	7	64	1.467
第 10 组	16	8	56	1.412
第 11 组	18	9	48	1.273
第 12 组	20	10	40	1.027

3.2 土拱破坏准则的确定

根据离心模型试验的加载方法,数值模拟采用逐级增加重力加速度直到土拱发生破坏为止。加载时监测桩间土体中心截面处的位移,在某一荷载若监测点处位移能最终保持不变即视此时桩间土拱是稳定的,若监测点的位移在荷载不增加的情况下反而持续增加,则判定土拱失稳,如图 4 所示。

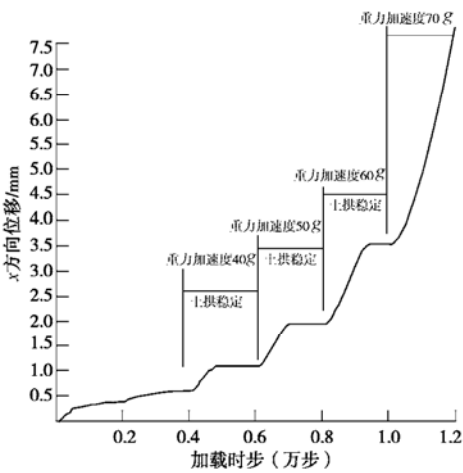


图 4 加载过程中桩间中心截面处的 X 方向位移曲线

Fig. 4 The curve of X-displacement of the middle section between piles during the process of loading

3.3 桩间净距不变时的土拱承载能力

桩间净距保持 10 cm 不变,桩宽度由 2 cm 增大到 15 cm,即表 1 中第 1~6 组试验。定义土拱承载能力为研究平面内土体单元传递到抗滑桩处的应力大小,按照前述的土拱破坏判断准则,在其它参数不变的情况下得到不同桩宽度土拱破坏之前的承载能力,其结果如表 1 所示。将表 1 中的数据绘制成土拱承载能力

与桩间净距的关系曲线,其结果如图 5 所示。从图中可以看出,总的趋势是随桩宽度的增加,桩间土拱承载能力上升,但上升的斜率逐渐变缓,说明随着桩宽度的变大,桩宽度的增加对桩间土拱承载能力的影响越来越小。

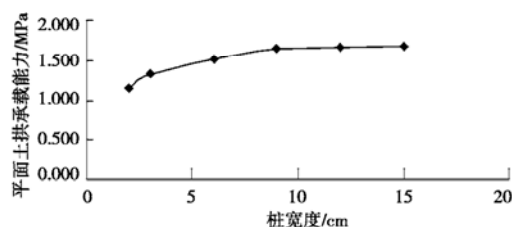


图 5 桩间净距相同时桩间土拱承载力曲线

Fig. 5 The curve of the bearing capacity of soil arching with the same space between piles

3.4 桩间净距与桩宽度比值不变时的土拱承载能力

有学者以桩间距与桩宽度的比值作为指标来衡量桩间土拱的稳定性,认为减小桩间净距与增大桩宽度对于桩间土拱的承载能力而言是等效的^[13, 17]。本文试对此进行数值模拟验证。保持桩间净距与桩宽度的比值不变,桩宽度由 5 cm 增大到 10 cm,即表 1 中第 7~12 组试验。按照前述破坏准则,在其它参数不变的情况下得到不同桩宽度土拱破坏之前的承载能力,其结果如表 1 所示。将表 1 中的数据绘制成土拱承载能力与桩间净距的关系曲线,其结果如图 6 所示。从图中可以看出,总的趋势是随桩宽度及桩间净距的增加,桩间土拱承载能力下降,且下降的斜率逐渐变陡,说明桩间净距对桩间土拱承载能力起着控制作用,即使桩间净距与桩宽度的比值不变,但增加桩宽度对土拱承载能力的贡献远不及增加桩间净距对土拱承载能力的削弱作用。

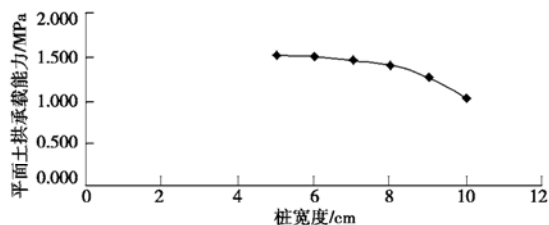


图 6 桩间净距与桩宽比值相同时桩间土拱承载力曲线

Fig. 6 The curve of the bearing capacity of soil arching with the same ratio of space and pile width

3.5 桩宽度与桩后应力分布分析

根据前面的讨论,当桩宽度达到一定程度时,再增加桩宽度对桩间土拱承载能力的贡献甚微。显然,从经济技术合理性的角度出发,存在一个合理的桩宽

度范围,试从不同桩宽桩后应力分布对此进行讨论。将不同桩宽度桩后截面 X 方向应力分布云图进行对比分析(如图 7 所示),可以看到,桩后 X 方向应力随桩宽度增加,平均应力值减小,但分布不均匀性增加,应力较大的区域集中在靠近桩间一侧。因此,桩间土拱的拱脚宽度并非完全随桩宽度的增加而成比例的增加,桩间土拱的拱脚区域集中在一个有限范围内。

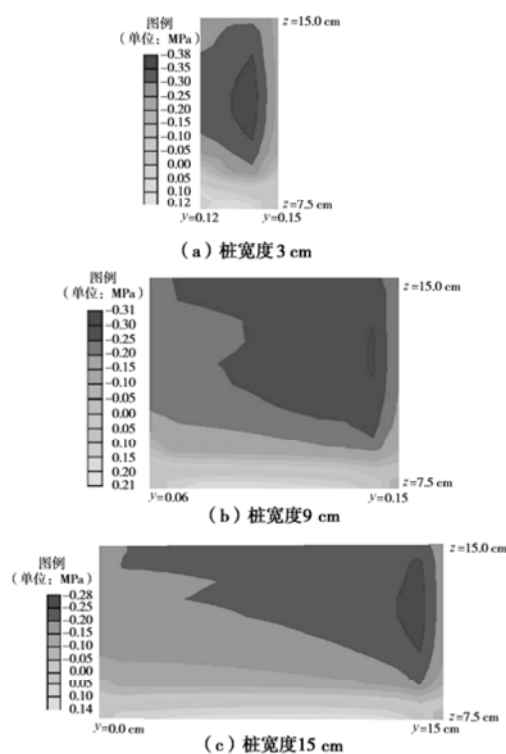


图 7 不同桩宽时桩后 X 方向应力分布云图

Fig. 7 The SXX nephogram in the back of piles with different widths

4 结 语

(1) 根据离心模型试验现象,可以定性地得到桩宽度对桩间土拱形状及矢高没有太大的影响,但对拱脚的稳定性有较大的影响。

(2) 数值模拟研究表明:在桩间净距保持不变的情况下,桩间土拱的承载能力随桩宽度的增加而逐渐增加,但上升的斜率逐渐减小,说明随着桩宽度变大,桩宽度的增加对桩间土拱承载能力的影响越来越小。

(3) 数值模拟研究表明:在桩间净距与桩宽度比值保持不变的情况下,桩间土拱的承载能力随桩宽度的增加反而降低,且下降的斜率逐渐变陡,说明桩间净距对桩间土拱承载能力起着控制作用,增加桩宽度对土拱承载能力的贡献远不及增加桩间净距对土拱承

载能力的削弱作用。

(4) 从不同桩宽度桩后 X 方向应力分布的情况分析表明: 桩后 X 方向应力分布随桩宽度的增加其应力平均值减小, 但分布的不均匀性增加; 桩间土拱拱脚区域集中在一个有限的范围内, 并非完全随桩宽度的增加而无限增大。

(5) 综合以上分析结论, 笔者认为抗滑桩合理桩间距与桩宽度是非线性的关系, 而不是简单的线性增加的关系, 在建立抗滑桩合理桩间距计算模型时应对此进行修正或考虑其适用条件。

(6) 本文对桩宽度、桩净间距对土拱效应的影响进行了初步的研究, 由于受试验和数值模拟数量的限制, 得出的关系还是定性的, 离定量规律和工程应用还需要进行更多的模型试验及现场实测资料的验证。

参考文献:

- [1] 吴子树, 张利民, 等. 土拱的形成机理及存在条件的探讨[J]. 成都科技大学学报, 1995(2): 15 - 19. (WU Zi-shu, ZHANG Li-min, et al. Studies on the mechanism of arching action in loess[J]. Journal of Chengdu University of Science and Technology, 1995(2): 15 - 19. (in Chinese))
- [2] 王成华, 陈永波, 等. 抗滑桩间土拱特性及最大桩间距分析[J]. 山地学报, 2001, 19(6): 556 - 559. (WANG Cheng-hua, CHEN Yong-bo, et al. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile[J]. Journal of Mountain Science, 2001, 19(6): 556 - 559. (in Chinese))
- [3] 冯 君, 吕和林, 王成华. 普氏理论在确定抗滑桩间距中的应用[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(6): 79 - 81. (FENG Jun, LÜ He-lin, WANG Cheng-hua. Application of M. M. Promojyafakonov theory to solution of distance between anti-slide piles[J]. China Railway Science, 2003, 24(6): 79 - 81. (in Chinese))
- [4] 贾海莉, 王成华, 等. 基于土拱效应的抗滑桩与护壁桩的桩间距分析[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 98 - 103. (JIA Hai-li, WANG Cheng-hua, et al. Analysis of pile spacing between anti-sliding piles and retaining piles in accordance with soil arching effect[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(1): 98 - 103. (in Chinese))
- [5] 周德培, 肖世国, 等. 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, et al. 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))
- [6] 郑 磊, 殷坤龙, 简文星, 等. 抗滑桩设计中关于确定桩间距问题的分析[J]. 水文地质工程地质, 2005(6): 71 - 74. (ZHENG Lei, YIN Kun-long, JIAN Wen-xing, et al. Analysis on spacing between piles in the design of anti-slide pile[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005(6): 71 - 74. (in Chinese))
- [7] 王乾坤. 抗滑桩的桩间土拱和临界间距的探讨[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(8): 64 - 67. (WANG Qian-kun. Discussion on the soil arching effect and the critical spacing between adjacent anti-slide piles[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(8): 64 - 67. (in Chinese))
- [8] 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 - 462. (ZHOU Ying-hua, ZHOU De-pei, FENG 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 - 462. (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. (in Chinese))
- [10] 熊良宵, 李天斌. 土拱效应在抗滑桩工程中的应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(3): 275 - 277. (XIONG Liang-xiao, LI Tian-bin. Application of soil arching effect to the anti-sliding pile engineering[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(3): 275 - 277. (in Chinese))
- [11] 蒋良潍, 黄润秋, 蒋忠信. 黏性土桩间土拱效应计算与桩间距分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(3): 445 - 450. (JIANG Liang-wei, HUANG Run-qiu, JIANG Zhong-xin. Analysis of soil arching effect between adjacent piles and their spacing in cohesive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 445 - 450. (in Chinese))
- [12] 贾海莉, 王成华, 等. 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, et al. Discussion on some issues in theory of soil arch[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2003, **38**(4): 398 - 402. (in Chinese))
- [13] 张建勋, 陈福全, 简洪钰. 被动桩中土拱效应问题的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(2): 174 - 178. (ZHANG Jian-xun, CHEN Fu-quan, JIAN Hong-yu. Numerical analysis of soil arching effects in passive piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(2): 174 - 178. (in Chinese))
- [14] CHEN C Y, MARTIN G R. Soil-structure interaction for landslide stabilizing piles[J]. Computers and Geotechnics, 2002(29): 363 - 386.
- [15] 张建华, 谢 强, 等. 抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(4): 699 - 703. (ZHANG Jian-hua, XIE Qiang, et al. Arching effect of anti-slide pile structure and its numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(4): 699 - 703. (in Chinese))
- [16] 韩爱民, 肖军华, 梅国雄. 被动桩中土拱形成机理的平面有限元分析[J]. 南京工业大学学报, 2005, **27**(3): 89 - 92. (HAN Ai-min, XIAO Jun-hua, MEI Guo-xiong. Plane FEA of soil arching effects mechanism in passive piles[J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2005, **27**(3): 89 - 92. (in Chinese))
- [17] 李忠诚, 杨 敏. 被动受荷桩成拱效应及三维数值分析[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(3): 114 - 117. (LI Zhong-cheng, YANG Min. Soil arching effect on passive piles and 3-D numerical analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, **39**(3): 114 - 117. (in Chinese))
- [18] 琚晓冬, 冯文娟, 朱金明. 桩后土拱作用范围研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2006, **28**(3): 197 - 200. (JU Xiao-dong, FENG Wen-juan, ZHU Jin-ming. Research on affecting scope of soil arch behind anti-slide piles[J]. Journal of China Three Gorges Univ (Natural Sciences), 2006, **28**(3): 197 - 200. (in Chinese))
- [19] 韩爱民, 肖军华, 梅国雄. 被动桩中土拱效应特征与影响参数研究[J]. 工程地质学报, 2006, **14**(1): 111 - 116. (HAN Ai-min, XIAO Jun-hua, MEI Guo-xiong. Behavior of soil arching between passive piles and effects parameters study[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, **14**(1): 111 - 116. (in Chinese))