



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2016.02.021

周爱红, 何国峰, 袁颖, 等. 基于正交试验的双排抗滑桩的土拱效应影响因素研究[J]. 2016, 14(2): 118-124.

ZHOU Ai hong, HE Guo feng, YUAN Ying, et al. Influencing factors of soil arching effect of double row piles based on orthogonal test[J]. 2016, 14(2): 118-124. (in Chinese)

# 基于正交试验的双排抗滑桩的土拱效应影响因素研究

周爱红<sup>1</sup>, 何国峰<sup>2</sup>, 袁颖<sup>1</sup>, 胡龙虎<sup>3</sup>

(1. 河北地质大学 勘查技术与工程学院, 石家庄 050031;

2. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210046; 3. 中国石油工程建设公司 华东环境岩土工程分公司, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 土拱效应对双排抗滑桩的合理布置和优化设计有重要影响, 而影响土拱效应的因素较多, 引入正交试验的方法, 研究了影响抗滑桩土拱效应的六种因素的主次关系, 以桩边长、桩间距、岩土体性质、泊松比、接触面参数和排间距六种因素组成六因素五水平的正交实验设计, 基于 PLAXIS 有限元软件对抗滑桩的土拱效应进行了数值模拟。研究结果表明, 桩间距、泊松比和排间距是影响土拱效应的主要因素, 岩土体性质、接触面参数和桩边长为次要因素, 因素间存在耦合作用, 各因素取合适的水平, 土拱效应会得到较好的发挥。

**关键词:** 抗滑桩; 土拱效应; 正交试验; 数值模拟

**中图分类号:** TU473    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0118-07

## Influencing factors of soil arching effect of double row piles based on orthogonal test

ZHOU Ai hong<sup>1</sup>, HE Guo feng<sup>2</sup>, YUAN Ying<sup>1</sup>, HU Long hu<sup>3</sup>

(1. School of Prospecting Technology and Engineering of Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China;

2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210046, China; 3. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Huadong Environment & Geotechnical Engineering Branch, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** It is of great significant to consider soil arching effect on the reasonable arrangement and optimization design of double row anti slide pile. There are many factors affecting soil arching effect, thus the orthogonal test is used to investigate the major and minor relations of the six factors that affect the soil arching effect of anti slide pile. The six factors, including pile length, pile spacing, property parameters, Poisson's ratio, interface parameters and row spacing, were used to form an orthogonal test design by six factors with five levels, and the finite element analysis software PLAXIS was used to carry out the numerical simulation. The results showed that the pile spacing, the Poisson's ratio and row spacing were the major factors of soil arching effect, and property parameters, interface parameters and pile length were the minor factors. There existed coupled effect among these factors and the combination of their appropriate levels would be benefit for the soil arching effect.

**Key words:** anti slide pile; soil arching effect; orthogonal test; numerical simulation

国内外学者们对土拱效应的研究已经取得了很多成果, 太沙基<sup>[1]</sup>活动门试验证实土拱效应的存在,

Koutsabeloulis 等<sup>[2]</sup>根据活动门试验建立了可分别适用于不同工程问题的主动模型和被动模型, 其结

收稿日期: 2015-03-26    修回日期: 2015-12-19    网络出版时间: 2016-03-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160324.1440.002.html>

**基金项目:** 国家自然科学基金(41301015); 国家大坝安全工程技术研究中心开放基金(NDSKFJJ1201); 河北省教育厅自然科学重点项目(ZD2015073; ZD2016038); 石家庄经济学院国家自然科学基金预研基金(sjy201203)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China(41301015); The Open Fund of State Dam Safety Engineering Technology Research Center(NDSKFJJ1201); The Key Program of the Hebei Education Department(ZD2015073; ZD2016038); National Natural Science pre Research Fund of Shijiazhuang University Of Economics(sjy201203)

**作者简介:** 周爱红(1976-), 女, 河北唐山人, 副教授, 博士, 主要从事防灾减灾的教学和科研工作。E-mail: sensiblecall@163.com

**通讯作者:** 何国峰(1987-), 男, 湖北黄冈人, 博士生, 主要从事地质灾害防治和设计的研究。E-mail: hgf1987@163.com

果与理论推导的结果相比证明了其模型的适用。夏永成等<sup>[3,8]</sup>对影响土拱效应的岩土体参数、泊松比、布桩方式、桩的截面形式、桩间距等进行了分析研究。徐海洋等<sup>[9,12]</sup>采用有限元方法,分别研究了抗滑桩桩侧摩阻力、不同土性及组合、桩土分担比等情况下土体及土拱位移、应力等的变化规律、土拱的计算方法、使用条件及对土拱效应的影响。年廷凯等<sup>[13,17]</sup>从三维模型入手,研究了超载情况下抗滑桩加固边坡的桩间土拱的分布、发展及破坏规律,并以工程实例验证了研究结果的正确性和适用性。上官云龙等<sup>[18,19]</sup>结合工程实例和地层结构特征等,研究了抗滑桩的优化设计方法。以上的这些研究成果在工程实践中得到了一定的应用,证明土拱效应的研究具有重要的实用价值。

但是,影响土拱效应的因素很多,对于不同的滑坡,滑坡体的岩土体性质、桩径、接触面粗糙程度等因素都会对抗滑桩的布置造成影响。在分析影响土拱效应的因素时,很多研究都做单因素分析,没有确定影响土拱效应的因素的主次关系,对于考虑不同治理条件的抗滑桩设计不能确定按哪些影响因素进行优化设计;另外在大型滑坡治理工程中常用到多排桩的支护,而对排桩的研究目前大多停留在单排桩的研究中,多排桩的影响因素的主次关系及其合理布置需要更多的研究,以指导排桩的优化设计,本文将结合二维模型在这些方面开展研究工作。

## 1 模型的建立

本文采用 PLAXIS 二维模型对抗滑桩的土拱效应进行研究。PLAXIS 软件是一款专门用于各种岩土工程问题中变形和稳定性分析的二维有限元计算软件。模型建立时,滑坡体按单位厚度的土层来考虑,抗滑桩嵌入基岩按固定边界考虑,下滑推力等效为作用于桩前单位厚度土层上的均布荷载,计算模型见图 1,土层位移在二维平面上只做水平方向移动,左右边界为  $X$  方向约束,桩前侧取 10 倍桩宽,边界为  $Y$  方向约束。土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型,相关土体参数见表 1。抗滑桩采用线弹性本构模型,其弹性模量为  $3.00E+07$  kPa,泊松比为 0.2。桩土接触面采用参数  $R_{inter}$  来表示桩土接触面摩擦程度,计算中的桩土接触面参数分别介于 0~1 之间,  $R_{inter} = 0$  表示桩土接触面光滑,  $R_{inter} = 1$  表示桩土接触面没有相对滑动。

## 2 正交试验设计与分析

正交试验设计是研究多因素多水平的一种设计

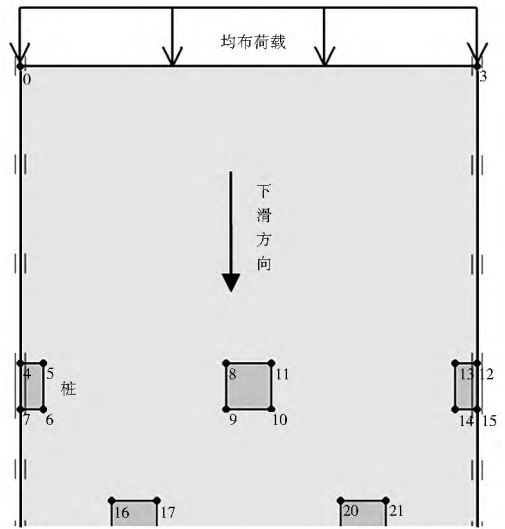


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model plan

表 1 土体计算参数

Tab. 1 The soil calculation parameters

弹性模量 $E$ / kPa	黏聚力 $c$ / kPa	内摩擦角 $\varphi$ (°)	容重 $\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )
40 000	30	30	20
20 000	30	25	19
10 000	25	20	20
6 000	23	16	20
3 000	20	15	19

方法,它是根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些有代表性的点具备了“均匀分散,齐整可比”的特点,是一种高效率、快速、经济的实验设计方法。本文中的六种因素五种水平如果全部做试验来分析的话,六种因素和各因素的五种水平需要进行  $5^6 = 15\ 625$  次试验,实施起来工作量庞大,基本上不可能完成。如果应用正交试验法,只做  $L_{25}(5^6) = 6 \times (5-1) + 1 = 25$  次试验就可以了,而且在某种意义上讲,这 25 次试验代表了 15 625 次试验。

### 2.1 正交试验设计

本文在单排桩的分析研究基础上<sup>[20]</sup>,取抗滑效果较好的品字形布桩型式,进行双排抗滑桩的土拱效应研究,将影响抗滑桩土拱效应的桩边长、桩间距、弹性模量、泊松比、接触面参数和排间距六种因素按照六因素五水平的正交表进行 25 组试验,见表 2。试验所取桩的尺寸为工程设计中常用的界面尺寸,  $b$  为桩宽,经验上认为桩间距在 3~5 倍桩宽时土拱效应较明显,这里取 2~6 倍为合理范围,排间距也取 2~6 倍桩宽。由于土体参数中同一组弹性模量与黏聚力、内摩擦角是对应的,因此取弹性模量代表岩土体性质。

表 2 土拱效应影响因素与水平

Tab. 2 Factors and levels of soil arching effect

水平	影响因素					
	桩边长 / m	桩间距 / m	$E$ / MPa	泊松比	$R_{inter}$	排间距 / m
1	1.5×2	2b	3	0.2	0.2	2b
2	2×2	3b	6	0.24	0.4	3b
3	2×2.5	4b	10	0.28	0.6	4b
4	2×3	5b	20	0.32	0.8	5b
5	2.5×3	6b	40	0.35	1	6b

## 2.2 正交试验分析

根据大型滑坡下滑段下滑推力的大小,取均布荷载为  $100 \text{ kN/m}^2$ ,取各因素在不同水平下的最大

主应力作为指标,所得到的正交试验表的设计及结果见表 3,表中各因素和水平按照正交表排列。每组试验进行数值模拟可得到最大主应力的值,表中  $\tilde{N}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$  分别为同一水平下的最大主应力之和, $R$  为各列中  $\tilde{N}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$  中最大值与最小值之差,即极差。极差可以反映各因素的水平变动对试验结果影响的大小,极差大表示该因素的水平变动对试验结果的影响大,极差小表示该因素的水平变动对试验结果的影响小。当比较同一因素的  $\tilde{N}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$  的大小时,可以认为其他五种因素对  $\tilde{N}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$  的影响是大体相同的,因此可以把  $\tilde{N}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$ 、 $\tilde{\sigma}$  之间的差异看作是由于此因素取了五个不同的水平而引起的。

表 3 正交试验表及结果

Tab. 3 Orthogonal test and results

试验号	桩边长 / m	桩间距 / m	$E$ / MPa	泊松比	$R_{inter}$	排间距 / m	主应力 / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ )
	1	2	3	4	5	6	
1	1.5×2	2b	40	0.35	1	2b	- 230.04
2	1.5×2	3b	20	0.32	0.8	3b	- 296.86
3	1.5×2	4b	10	0.28	0.6	4b	- 274.6
4	1.5×2	5b	6	0.24	0.4	5b	- 301.30
5	1.5×2	6b	3	0.2	0.2	6b	- 282.71
6	2×2	2b	20	0.28	0.4	6b	- 230.05
7	2×2	3b	10	0.24	0.2	2b	- 242.74
8	2×2	4b	6	0.2	1	3b	- 323.21
9	2×2	5b	3	0.35	0.8	4b	- 343.06
10	2×2	6b	40	0.32	0.6	5b	- 347.96
11	2×2.5	2b	10	0.2	0.8	5b	- 176.82
12	2×2.5	3b	6	0.35	0.6	6b	- 286.24
13	2×2.5	4b	3	0.32	0.4	2b	- 281.21
14	2×2.5	5b	40	0.28	0.2	3b	- 321.70
15	2×2.5	6b	20	0.24	1	4b	- 283.00
16	2×3	2b	6	0.32	0.2	4b	- 235.74
17	2×3	3b	3	0.28	1	5b	- 212.27
18	2×3	4b	40	0.24	0.8	6b	- 288.29
19	2×3	5b	20	0.2	0.6	2b	- 231.81
20	2×3	6b	10	0.35	0.4	3b	- 327.62
21	2.5×3	2b	3	0.24	0.6	3b	- 217.99
22	2.5×3	3b	40	0.2	0.4	4b	- 263.47
23	2.5×3	4b	20	0.35	0.2	5b	- 370.21
24	2.5×3	5b	10	0.32	1	6b	- 260.38
25	2.5×3	6b	6	0.28	0.8	2b	- 232.83
I	- 1 385.56	- 1 090.64	- 1 451.46	- 1 557.17	- 1 308.90	- 1 218.63	
$\tilde{\sigma}$	- 1 487.02	- 1 301.58	- 1 411.93	- 1 422.15	- 1 337.86	- 1 487.38	
$\tilde{\sigma}$	- 1 348.97	- 1 537.57	- 1 282.21	- 1 271.50	- 1 358.65	- 1 399.92	
$\tilde{\sigma}$	- 1 295.73	- 1 458.25	- 1 379.32	- 1 333.32	- 1 403.65	- 1 408.56	
$\tilde{\sigma}$	- 1 344.88	- 1 474.12	- 1 337.24	- 1 278.02	- 1 453.10	- 1 347.67	
R	191.29	446.93	169.25	285.67	144.20	268.75	

由表 3 和图 2 可得, 对抗滑桩的土拱效应影响大小的顺序为: 桩间距的影响最大, 泊松比和排间距次之, 然后依次是桩边长、弹性模量和接触面参数。

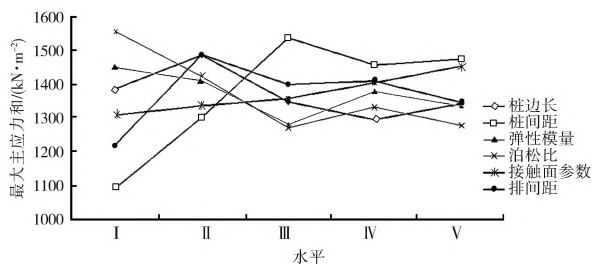


图 2 各因素在不同水平下最大主应力和的变化规律

Fig.2 The maximal principal stress variation of factors at different levels

由于 $\bar{\xi}$ 、 $\bar{\eta}$ 、 $\bar{\theta}$ 、 $\bar{\delta}$ 、 $\bar{\omega}$ 之间的差异是由于此因素取了五个不同的水平而引起的, 因此, 从图 2 可看出, 抗滑

桩的桩边长为 1.5 m × 2 m、2 m × 2 m、2 m × 2.5 m、2 m × 3 m、2.5 m × 3 m 时, 土拱效应在桩边长为 2 m × 2 m 时较明显; 桩间距取 4 倍桩宽时土拱效应最明显; 弹性模量在 40MPa 时土拱效应最明显; 泊松比为 0.35 左右土拱效应最明显;  $R_{inter} = 0.2$  时土拱效应最明显; 排间距在 3 倍桩宽时, 土拱效应发挥最好。在岩土体的性质已经确定的情况下, 可根据土体性质选择合适的桩边长和桩间距, 以达到最佳抗滑效果。本文还对桩间距超过 6 倍桩宽的参数建立正交表进行了试验, 结果表明: 桩间距依然是土拱效应最主要的影响因素, 并且当桩间距大于 6 倍桩宽时, 主应力值持续减小, 说明桩间距在 4 倍桩宽时能最大的发挥土拱效应及后排桩的作用, 限于篇幅, 这里不再详述。

当把均布荷载加到 150 kN/m<sup>2</sup> 时, 利用上述六因素组成五水平的正交试验分析, 正交试验表见表 4。

表 4 正交试验表及结果  
Tab.4 Orthogonal test and results

试验号	桩边长/m		桩间距/m	E/MPa	泊松比	$R_{inter}$	排间距/m	主应力 / (kN · m <sup>-2</sup> )
	1	2						
1	1.5 × 2	2b	40	40	0.35	1	2b	- 365.24
2	1.5 × 2	3b	20	20	0.32	0.8	3b	- 439.60
3	1.5 × 2	4b	10	10	0.28	0.6	4b	- 433.52
4	1.5 × 2	5b	6	6	0.24	0.4	5b	- 465.22
5	1.5 × 2	6b	3	3	0.2	0.2	6b	- 422.75
6	2 × 2	2b	20	20	0.28	0.4	6b	- 343.05
7	2 × 2	3b	10	10	0.24	0.2	2b	- 350.36
8	2 × 2	4b	6	6	0.2	1	3b	- 487.42
9	2 × 2	5b	3	3	0.35	0.8	4b	- 400.70
10	2 × 2	6b	40	40	0.32	0.6	5b	- 504.22
11	2 × 2.5	2b	10	10	0.2	0.8	5b	- 219.46
12	2 × 2.5	3b	6	6	0.35	0.6	6b	- 420.81
13	2 × 2.5	4b	3	3	0.32	0.4	2b	- 410.49
14	2 × 2.5	5b	40	40	0.28	0.2	3b	- 462.29
15	2 × 2.5	6b	20	20	0.24	1	4b	- 424.51
16	2 × 3	2b	6	6	0.32	0.2	4b	- 339.35
17	2 × 3	3b	3	3	0.28	1	5b	- 371.51
18	2 × 3	4b	40	40	0.24	0.8	6b	- 386.70
19	2 × 3	5b	20	20	0.2	0.6	2b	- 357.72
20	2 × 3	6b	10	10	0.35	0.4	3b	- 499.45
21	2.5 × 3	2b	3	3	0.24	0.6	3b	- 331.19
22	2.5 × 3	3b	40	40	0.2	0.4	4b	- 361.30
23	2.5 × 3	4b	20	20	0.35	0.2	5b	- 551.80
24	2.5 × 3	5b	10	10	0.32	1	6b	- 373.71
25	2.5 × 3	6b	6	6	0.28	0.8	2b	- 374.41
I	- 2 126.33	- 1 598.29	- 2 079.75	- 2 079.75	- 2 238.00	- 2 022.39	- 1 858.22	
$\bar{\eta}$	- 2 085.75	- 1 943.58	- 2 116.68	- 2 116.68	- 2 067.37	- 1 820.87	- 2 219.95	
$\bar{\theta}$	- 1 937.56	- 2 269.93	- 1 876.50	- 1 876.50	- 1 984.78	- 2 047.46	- 1 959.38	
$\bar{\delta}$	- 1 954.73	- 2 059.64	- 2 087.21	- 2 087.21	- 1 957.98	- 2 079.51	- 2 112.21	
$\bar{\omega}$	- 1 992.41	- 2 225.34	- 1 936.64	- 1 936.64	- 1 848.65	- 2 126.55	- 1 947.02	
R	188.77	671.64	240.18	240.18	389.35	305.68	361.73	

由表 4 可看出, 对抗滑桩的土拱效应影响大小的顺序为: 桩间距的影响最大, 泊松比和排间距次之, 然后依次是接触面参数、弹性模量和桩边长。跟  $100 \text{ kN/m}^2$  时对抗滑桩的土拱效应影响大小的顺序相比, 影响因素中桩间距、泊松比和排间距的次序是一致的, 仅桩边长、弹性模量和接触面参数稍微有些波动, 因此可以将桩间距、泊松比和排间距作为主要因素, 桩边长、弹性模量和接触面参数作为次要因素考虑。

由图 3 可知, 抗滑桩的桩边长为  $1.5 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 、 $2.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  时, 土拱效应在桩边长为  $1.5 \times 2 \text{ m}$  时最明显; 取 4 倍桩宽时土拱效应最明显, 6 倍次之; 弹性模量在  $20 \text{ MPa}$  时土拱效应最明显,  $40 \text{ MPa}$  次之; 泊松比为  $0.35$  左右最能体现土拱效应;  $R_{\text{inter}} = 0.2$  土拱效应最明显; 排间距在 3 倍桩宽时, 土拱效应发挥最好。

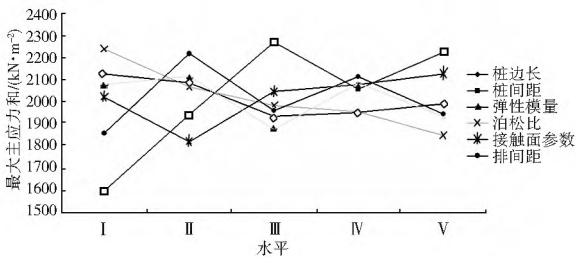


图 3 各因素在不同水平下最大主应力和的变化规律

Fig. 3 The maximal principal stress variation of factors at different levels

通过加大均布荷载可以发现, 影响土拱效应的主要因素是相同的, 仅次要因素有些波动。同时加大荷载, 最大主应力也同等增大, 在 25 组试验中,  $100 \text{ kN/m}^2$  和  $150 \text{ kN/m}^2$  下的最大主应力见图 4, 从图中可以看出,  $150 \text{ kN/m}^2$  下的各组试验最大主应力值几乎等于  $100 \text{ kN/m}^2$  下的各组试验中的最大主应力值的 1.5 倍, 由此可以确定, 在各因素一定的条件下, 增大均布荷载, 最大主应力同等比例增大。

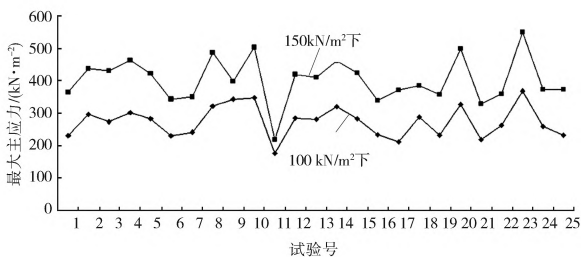


图 4 均布荷载为  $100 \text{ kN/m}^2$  和  $150 \text{ kN/m}^2$  下的最大主应力变化规律

Fig. 4 The variation of the maximal principal stress under  $100 \text{ kN/m}^2$  and  $150 \text{ kN/m}^2$

### 3 土拱效应分析

下面分析  $100 \text{ kN/m}^2$  下的最优组合的土拱效应, 得到桩边长为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、桩间距为 4 倍桩宽、岩土体性质为弹性模量在  $40 \text{ MPa}$ 、泊松比为  $0.35$ 、接触面参数为  $R_{\text{inter}} = 0.2$ 、排间距在 3 倍桩宽时的主应力分布图、水平位移分布图、垂直位移分布图和正应力阴影图见图 5- 图 8。

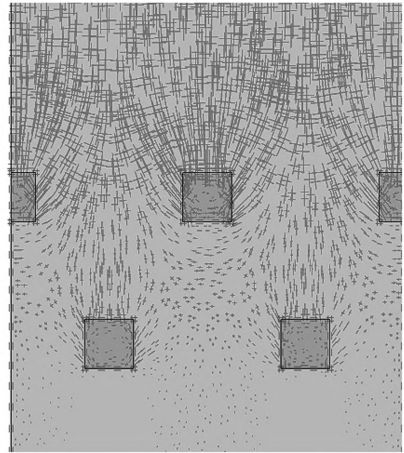


图 5 主应力分布

Fig. 5 The principal stress distribution

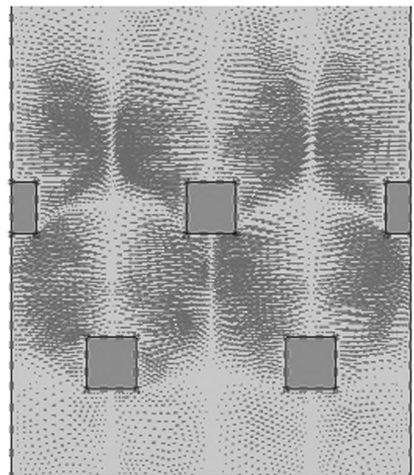


图 6 水平位移分布

Fig. 6 Horizontal displacement distribution

如图 5 所示, 图中应力十字叉中长的为第一主应力, 短的为第三主应力, 从图中可以看出, 后排桩后的主应力明显发生了偏转至桩上, 后排桩间的应力转移至前排桩上了, 并且后排桩比前排桩承担的应力相对大很多, 说明应力能很好的转移至桩上了, 起到了很好的抗滑效果。从图 6 可以看出, 后排桩之间的水平位移的方向在桩间发生了一次偏转, 从后排桩和前排桩的桩后部分来看, 桩后土体沿  $x$  方向均向桩间中心线移动, 产生挤压而形成应力拱, 后排桩和前排桩都形成了应力拱。从图 7 可以看出,

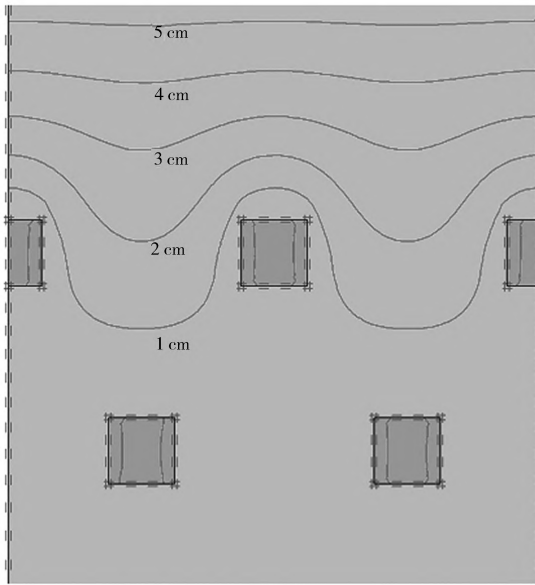


图7 垂直位移等值线

Fig. 7 Vertical displacement distribution

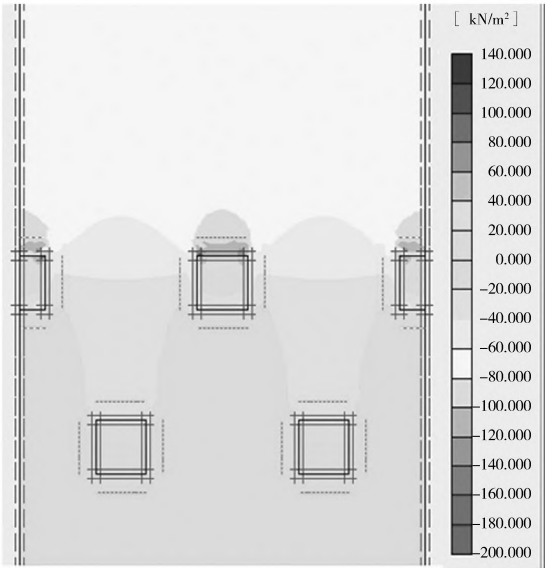


图8 正应力阴影

Fig. 8 Normal stress shadows

垂直方向仅在后排桩间有很大位移,土体在桩后因为应力较大,挤压变得密实,在后排桩中心处位移较大,在前排桩后,位移变化较小,说明后排桩起了抗滑作用。从图8可以看出,正应力在桩后发生应力偏转,形成了应力拱,将应力转移至桩上,后排桩承担了大部分应力,小部分应力由前排桩承担。

#### 4 结论

(1) 本文在土拱效应的影响因素分析研究中引入正交试验的方法,对土拱效应的影响因素进行了多因素多水平的分析,确定了影响土拱效应的因素的主次关系及最优组合,试验设计中能用25次试验

代表15625次试验,大大减少抗滑桩优化设计的工作量。

(2) 在不同均布荷载作用下,影响抗滑桩土拱效应的主要因素桩间距、泊松比和排间距不随均布荷载的变化而变化,仅次要因素弹性模量、接触面参数和桩边长的次序有些波动,说明各因素间可能存在耦合作用。

(3) 在双排桩的土拱效应影响因素研究过程中发现确定影响土拱效应的因素的主次关系,并将其应用于不同条件下的抗滑桩的设计中是非常重要的,后续将结合抗滑桩的优化设计进一步开展深入研究工作。

#### 参考文献(References):

- [1] Terzaghi K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [2] Koutsabeloulis N C, Griffiths D V. Numerical modeling of the trap door problem[J]. Geotechnique, 1989, 39(1): 77-89.
- [3] 夏永成. 考虑桩土相互作用的抗滑桩加固边坡设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (XIA Yong cheng. Study of the design method of slope reinforced with anti slide piles considering pile soil interaction[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [4] 刘金龙, 王吉利, 袁凡凡. 不同布置方式对双排抗滑桩土拱效应的影响[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010(3): 79-84. (LIU Jir long, WANG Ji li, YUAN Fan fan. Influence of layout style on soil arching effect of double row anti slide piles[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academic of Sciences, 2010(3): 79-84. (in Chinese))
- [5] 徐海洋. 考虑土拱效应的抗滑桩加固边坡数值分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012. (XU Hai yang. Numerical analysis of a slope reinforced with anti slide piles considering soil arching effect[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [6] 年廷凯, 徐海洋, 刘红帅, 等. 抗滑桩加固边坡三维数值分析中的几个问题[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2521-2526, 2535. (NIAN Ting kai, XU Hai yang, LIU Hong shuai, et al. Several issues in three dimensional numerical analysis of slopes reinforced with anti slide piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2521-2526, 2535. (in Chinese))
- [7] 年廷凯, 徐海洋, 李东晨, 等. 不同截面型式抗滑桩加固边坡数值分析[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(5): 695-701. (NIAN Ting kai, XU Hai yang, LI Dong sheng, et al. Numerical analysis of slope reinforcement with different cross section anti slide piles[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(5): 695-701. (in Chinese))
- [8] 李东晨. 基于有限元强度折减法的抗滑桩边坡体系稳定性研究[D]. 大连理工大学, 2013. (LI Dong sheng. Stability analysis of pile slope system using shear strength reduction finite element method[D]. Dalian University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [9] 年廷凯, 李东晨, 徐海洋, 等. 双排抗滑桩加固边坡稳定性与荷

- 载传递机制分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013(04): 124-129. ( NIAN Ting kai, LI Dong sheng, XU Hai yang, et al. Double row anti slide pile reinforced slope stability and load transfer mechanism analysis[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013(04): 124-129. ( in Chinese ) )
- [10] 年廷凯, 徐海洋, 李东晨, 等. 超载作用下边坡抗滑桩体系稳定性及土拱效应研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2014(02): 177-182. ( NIAN Ting kai, LI Dong sheng, XU Hai yang, et al. Research on stability and soil arching effect of slope pile system under uniform surcharge[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014(02): 177-182. ( in Chinese ) )
- [11] 文兴, 裴向军, 刘云鹏. 特殊截面抗滑桩受力特征与土拱效应分析[J]. 工程地质学报, 2013(05): 797-803. ( WEN Xing, PEI Xiang jun, LIU Yun peng. Stress characteristics and soil arch effect analysis of anti slide piles with special cross section[J]. Journal of Engineering Geology, 2013(05): 797-803. ( in Chinese ) )
- [12] 彭帅, 汪华斌, 周博, 等. 基于抗滑桩土拱效应形成的细观数值模拟[J]. 地质通报, 2013, 32(12): 1993-2000. ( PENG Shuai, WANG Hua bin, ZHOU Bo, et al. Microscopic numerical modeling research based on the formation of soil arching effect[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(12): 1993-2000. ( in Chinese ) )
- [13] 杨雪强, 吉小明, 张新涛. 抗滑桩桩间土拱效应及其土拱模式分析[J]. 中国公路学报, 2014(01): 30-37. ( YANG Xue qiang, JI Xiaoming, ZHANG Xin tao. Analysis of soil arching effect between anti slide piles and different arch body modes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014(01): 30-37. ( in Chinese ) )
- [14] 李新哲, 王振强, 覃勤, 等. 悬臂式抗滑桩桩间垂直拱的拱形及力学分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, (02): 329-332, 339. ( LI Xin zhe, WANG Zhen qiang, TAN Qin, et al. Analysis of arched and mechanical vertical arch cantilever anti slide piles[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014(02): 329-332, 339. ( in Chinese ) )
- [15] 燕继宇, 陈剑平, 闫欢, 等. 砂粘土层桩间土拱效应的数值分析[J]. 中国水运: 下半月, 2014(04): 117-121. ( YAN Ji yu, CHEN Jian ping, YAN Huan, et al. Sand clay interbedded between piles and numerical analysis of soil arching effect[J]. China Water Transport, 2014(04): 117-121. ( in Chinese ) )
- [16] 赵鑫, 胡新丽, 范付松, 等. 抗滑桩护壁外壁形态对土拱效应影响的数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2014(01): 57-60, 63. ( ZHAO Xin, HU Xin li, FAN Fu song, et al. Numeric simulation of the influences of morphology of protecting wall of anti sliding pile on soil arching effect[J]. Coal Geology and Exploration, 2014(01): 57-60, 63. ( in Chinese ) )
- [17] 上官云龙. 新岩滑坡成因机制及抗滑桩桩土效应研究[D]. 吉林大学, 2014. ( SHANGGUAN Yun long. Study on genetic mechanism and pile soil contact effect of anti slide piles of Xinyan Landslide[D]. Jilin University, 2014. ( in Chinese ) )
- [18] 许鹏. 汪延公路膨胀性软岩滑坡抗滑桩桩土效应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013. ( XU Peng. Study on pile soil contact effect of anti sliding piles in swelling soft rock landslide of Wangqing yanji Highway[D]. Changchun: Jilin University, 2014. ( in Chinese ) )
- [19] 雍睿. 三峡库区侏罗系地层推移式滑坡—抗滑桩相互作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014. ( YONG Rui. Interaction between Thrust Load Caused Landslide and Anti slide Pile in Jurassic Strata in Three Gorges Reservoir Region[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014. ( in Chinese ) )
- [20] 袁颖, 何国峰. 基于正交试验的抗滑桩的土拱效应研究[A]. // 力学与工程应用—第十五届北方七省市力学学会学术会议论文集[C]. 2014: 161-165. ( YUAN Ying, HE Guo feng. Study of the Soil Arching Effect of Anti slide Pile Based on Orthogonal Test[A]. // Mechanics and Engineering Application The Fifteenth Conference Proceedings of Mechanics in Seven Provinces of Northern[C]. 2014: 161-165. ( in Chinese ) )

(上接第 98 页)

- [18] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标的研究与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 61-62. ( WANG Jin song, GUO Jiang yong, ZHOU Yue wu, et al. Progress and prospect on drought indices research[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 61-62. ( in Chinese ) )
- [19] 王越, 江志红, 张强, 等. 基于 Palmer 湿润度指数的旱涝指标研究[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 387-389. ( WANG Yue, JIANG Zhi hong, ZHANG Qiang, et al. Comparative study of palmer's moisture anomaly index and Z index[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(3): 387-389. ( in Chinese ) )
- [20] 李士高. 陕西省干旱灾害年鉴[M]. 西安: 西安地图出版社, 1999. ( LI Shi gao. Yearbook of Shaanxi Drought Disaster. [M]. Xi'an: Xi'an Map Publishing House. ( in Chinese ) )