

基于土拱效应的斜插桩板墙受力数值模拟分析

屈俊童¹, 胡文斌¹, 段自侠², 张智聪¹

(1. 云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明 650504; 2. 云南永筑建设勘察设计有限公司, 云南 保山 678000)

摘要 目的 研究斜插式桩板墙在不同桩间净距土压力分布情况下受力性能. 方法 结合实际工程中斜插式桩板墙原型, 利用有限元软件 ABAQUS 建立桩间距分别为 250 mm、300 mm、350 mm、400 mm、450 mm 五种斜插桩板墙有限元模型, 分析对比了五种模型的桩后水平土压力、板后水平土压力、板后竖向土压力、板后摩擦土拱、桩结构受力、板结构受力等的变化规律. 结果 同一深度下, 桩后土体 Y 轴方向应力随着桩间净距增大逐渐增大; 受到模型桩间土拱、模型板间土拱、土摩擦角的综合影响, 板后 Y 方向土体应力呈非线性分布, 且影响程度随板厚土体深度变化; 板 X 轴方向应力随桩间净距增大而增大; 板两端 X 轴方向应力大于板中间 X 轴方向应力. 结论 随着桩间距增加, 桩后土体 Y 轴方向应力、桩结构受力、板结构受力均逐渐增大.

关键词 斜插桩板墙; 数值模拟; 土拱效应; 桩间距; 土压力

中图分类号 U417.1+1

文献标志码 A

Numerical Simulation Analysis on the Mechanical Behaviour of Oblique-inserted Slab-pile Wall Based on Soil Arching Effect

QU Juntong¹, HU Wenbin¹, DUAN Zixia², ZHANG Zhicong¹

(1. School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming, China, 650504; 2. Yunnan Yongzhu Construction Survey and Design Co. Ltd., Baoshan, China, 678000)

Abstract: Under the five groups of different pile spacing, the soil pressure distribution and the structure stress conditions of oblique-inserted slab-pile wall were studied. Combined with the actual project of oblique-inserted slab-pile wall prototype, five finite element models that pile spacing is respectively 250 mm, 300 mm and 350 mm, 400 mm and 450 mm were established. The variation law of post-pile horizontal earth pressure, post-plate horizontal earth pressure, post-plate vertical earth pressure, post-plate friction of soil arch, the force of pile, the force of plate with five finite element models were studied. The simulation results show that post-pile earth pressure in Y direction increases as pile spacing increases gradually at the same depth. Post-plate earth pressure in Y direction of model plate is influenced by the friction angle of soil, vertical soil arching between plate, the soil arch effect between pile and other comprehensive factors. The post-plate stress distribution is nonlinear. And as the depth changes, its influence degree is different. The stress of model plate in

收稿日期: 2018-03-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308471); 云南省应用基础研究青年计划项目(2015FD005)

作者简介: 屈俊童(1978—), 男, 教授, 博士, 主要从事防灾减灾及防护工程、岩土工程等方面研究.

X direction increases with the increase of pile spacing. The stress which is on both ends of the plate is larger than the stress which is in the middle of the plate. In summary, with the increase of pile spacing, post-pile earth pressure in Y direction, stress of pile structure and stress of plate structure increase gradually.

Key words: slanted pile wall; numerical simulation; soil arching effect; pile spacing; soil stress

进入 21 世纪以来,斜插式桩板墙新型支挡结构在市政道路、公路路基支挡中得到了较好应用,该新型支挡结构既能满足边坡支护功能,又能有效解决传统桩板墙无法实现墙体绿化的问题,具有美化环境、降低噪声、调节小气候等特点^[1]。

虽说斜插式桩板墙是由传统桩板墙结构发展而来,但由于其挡土板倾斜、土拱作用,使其在结构受力方面和传统桩板墙结构相比有着显著的不同。陈雷、姜楠楠等^[2-3]对斜插式桩板墙结构的设计理论及应用、绿化植物选配等问题进行了相关研究。李光明^[4]将斜插式桩板墙与锚索桩结合应用在高边坡支护中。速玉刚^[5]通过对 5 组不同挡土板倾角下的挂板式斜插桩板墙与传统桩板墙进行受力对比分析,得出了斜插式挡土板的最佳倾角为 43°。屈俊童等^[6]对斜插桩板墙中钢筋定位问题开展了相关研究。M. Sherif 等^[7]通过挡土墙模型试验发现,当墙后填料采用松散砂土时,土压力测试结果与静止土压力计算结果大致相同。J. Bosscher^[8]、吴汉辉^[9]等先后通过千斤顶进行了小型推桩试验,利用桩土荷载分担比等相关指标来间接研究桩间土拱效应。K. Terzaghi^[10]通过活动门试验证明现实中确实存在土拱效应,随后指出产生土拱效应的基本条件之一是存在支撑拱脚。R. L. Handy^[11]研究了沟槽介质由土拱效应所引起的应力再分布,把土拱效应发展分为了两阶段。H. W. Kingsley^[12]推导出的土拱形状相似于悬链线,并将所得方程表达式与圆弧形土拱的表达式进行对比,结果发现两种表达式所得结果基本吻合。CHEN Baoguo 等^[13]结合土拱离心试验和现场调查,探讨了土拱形成的客观条件,推导出了拱圈的最大

跨径计算方法。赵俭斌等^[14]利用 FLAC3D 软件分析了水平土拱在不同桩长、桩间距、荷载下的变化规律。

由之前的研究可知,不同桩间距形式下的斜插式桩板墙受力机理目前还不明确,尤其是土拱效应下斜插桩板墙的受力机理更是鲜有研究。基于此,笔者针对不同桩间距形式下的斜插式桩板墙受力机理、合理桩间距取值、板后摩擦拱等相关问题展开研究,进而优化斜插式桩板墙新型支挡结构。

1 本构模型及参数选取

笔者以昆明市西山区碧鸡山邑商业中心—茶马花街支挡工程实际工程为原型,数值分析结构的尺寸通过 20:1 的比例尺进行缩小^[15]。采用的屈服准则和本构模型分别为 Mohr – Coulomb 屈服准则、Mohr – Coulomb 本构模型^[16-18]。摩尔 – 库伦准则能够很好地反映岩土材料的抗拉、抗压强度,数值分析中材料参数见表 1。

表 1 材料参数

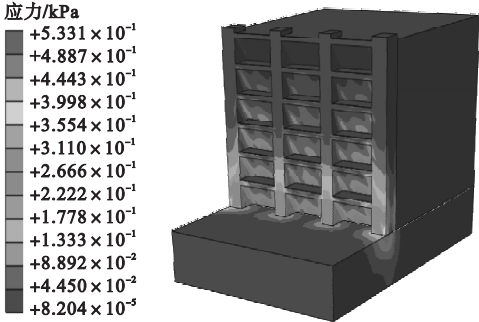
Table 1 Input parameters of numerical model			
材料	泊松比	弹性模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
标准砂	0.35	20	1 600
模型桩、板	0.25	11 600	540
混凝土底板	0.18	28 000	1 910

本次数值模型以室内模型试验为原型,建立了以模型高度方向为 Z 轴,长度方向为 Y 轴,宽度方向为 X 轴的 5 组模型,桩间净距分别为 250 mm、300 mm、350 mm、400 mm、450 mm。

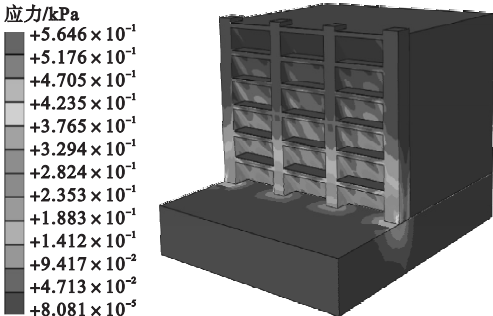
2 模拟结果分析

利用 ABAQUS 后处理功能得到了不同

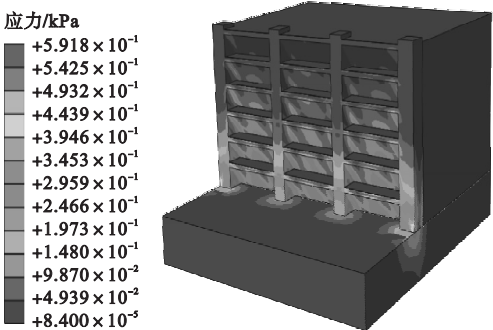
桩间净距下的 Mises 应力云图(见图 1). 从图中可以看出,桩间距越大,斜插板上的应力越大;Mises 应力随着桩间距的增大也在不断增大.



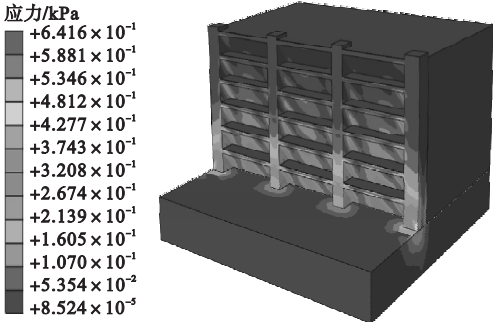
(a) 250 mm桩间净距



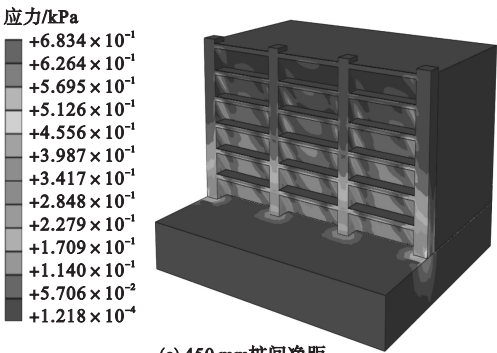
(b) 300 mm桩间净距



(c) 350 mm桩间净距



(d) 400 mm桩间净距



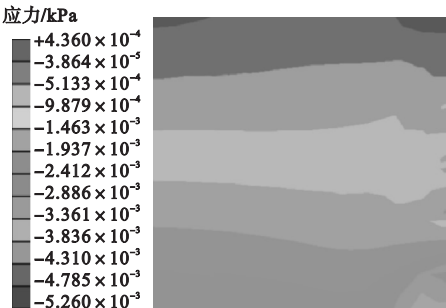
(e) 450 mm桩间净距

图 1 Mises 应力云图

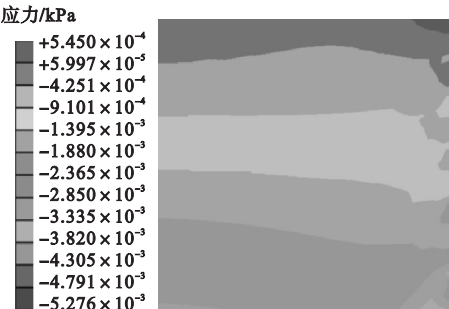
Fig. 1 Mises stress contour plot

2.1 桩后水平土压力

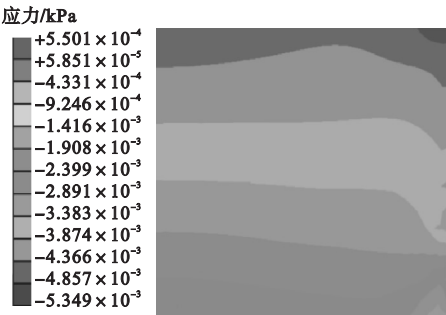
利用 ABAQUS 对模型进行后处理分析后,可得到不同桩间净距下桩后水平土压力的应力分布云图(见图 2).



(a) 250 mm桩间净距



(b) 300 mm桩间净距



(c) 350 mm桩间净距

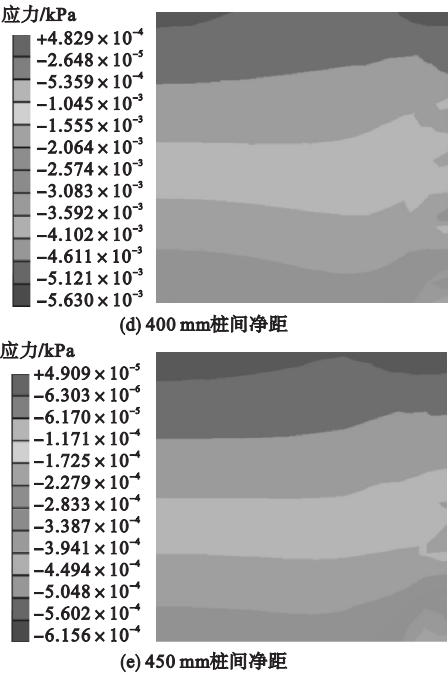


图2 桩后土压力应力云图

Fig. 2 Contour plot of post-pile soil pressure

经过 ABAQUS 软件分析计算后,通过 ABAQUS 数据提取功能,提取不同桩间距桩后土压力的结点数值(见表 2),最终可以绘制桩后土压力 Q 随悬臂段深度 S 变化的 $Q-S$ 曲线(见图 3). 由图 3 可知:①桩后土应力随着深度的增大而增大;②桩后土应力在同一深度下随着桩间距的增大也在不断增大.

表2 模型桩后土体应力

Table 2 Post-pile soil pressure					
深度/ mm	土体应力/kPa				
	桩间净距	桩间净距	桩间净距	桩间净距	桩间净距
	250 mm	300 mm	350 mm	400 mm	450 mm
60	0.436	0.543	0.631	0.715	0.758
180	1.252	1.343	1.587	1.659	1.877
300	1.925	2.187	2.328	2.526	2.654
420	2.587	2.752	2.987	3.236	3.385
540	3.124	3.301	3.525	3.629	3.745
660	3.235	3.402	3.603	3.738	3.895

2.2 板后水平土应力

利用 ABAQUS 对模型进行后处理分析后,可得到不同桩间距净距下板后水平土压力的应力分布云图(见图 4).

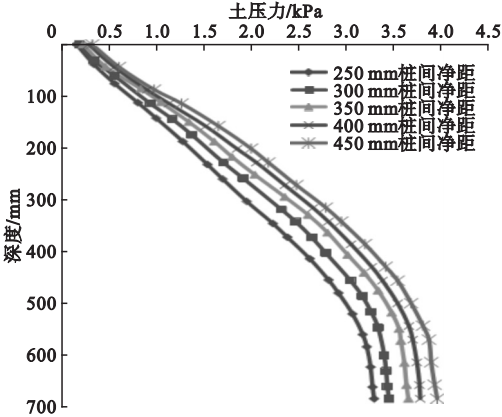
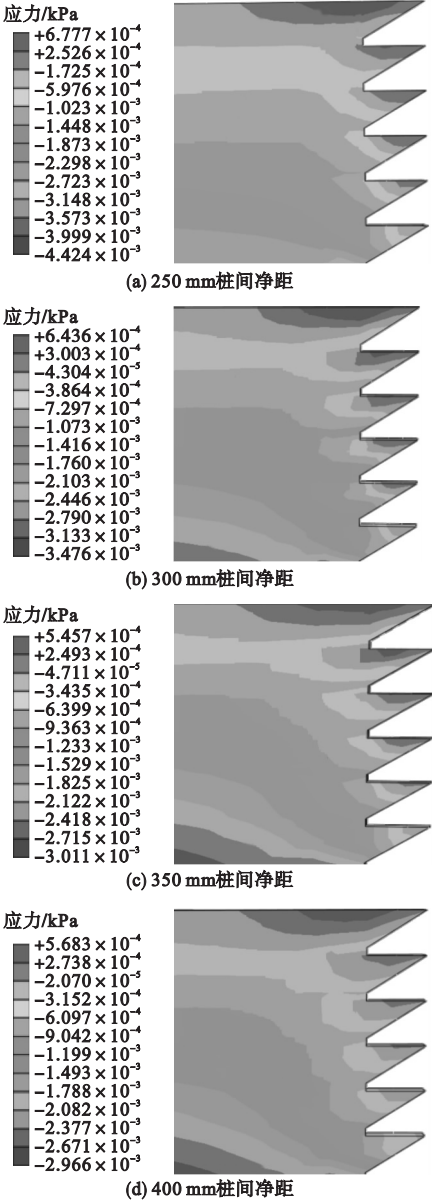


图3 桩后土压力 $Q-S$ 曲线

Fig. 3 $Q-S$ curves of post-pile soil pressure



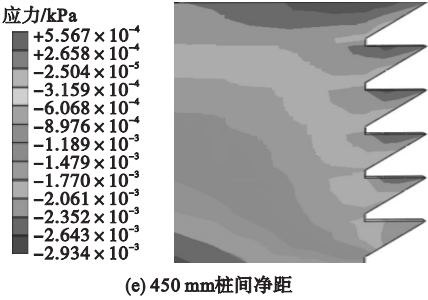


图4 板后水平土压力

Fig. 4 Post-plate horizontal soil pressure

利用 ABAQUS 的“路径”功能获取板后两端土单元 Y 方向应力、板后中间土体 Y 方向应力,分别绘制 Y 轴方向应力随深度变化 $Q-S$ 曲线(见图 5、图 6)

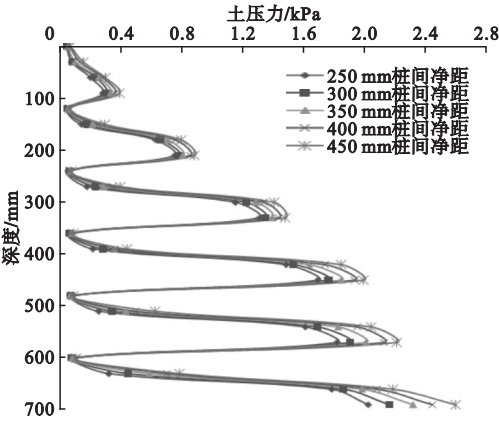


图5 板后两端土压力 $Q-S$ 曲线
Fig. 5 $Q-S$ curves of post-plate soil pressure on both ends of the plate

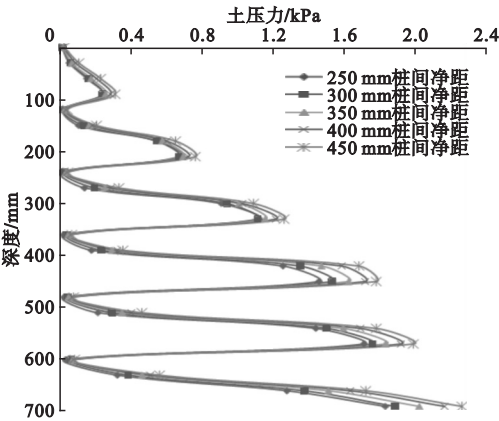
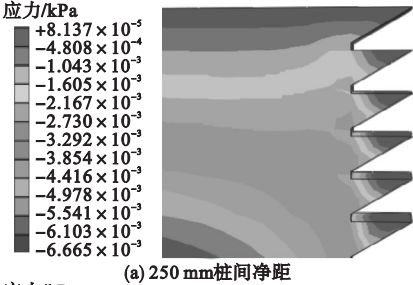


图6 板后中间土压力 $Q-S$ 曲线
Fig. 6 $Q-S$ curves of post-plate soil pressure on middle of the plate

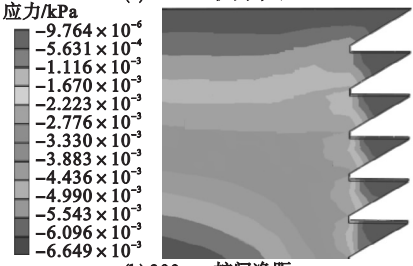
由图 4、图 5 可知:板后水平土应力在同一深度处随着桩间距的增大逐渐增大;并且其随着深度的增大呈递增趋势.板后两端土压力随着深度的增大也呈递增趋势.由图 6 可知:板后中间土压力随着深度的增大也呈递增趋势.

2.3 板后竖向土应力

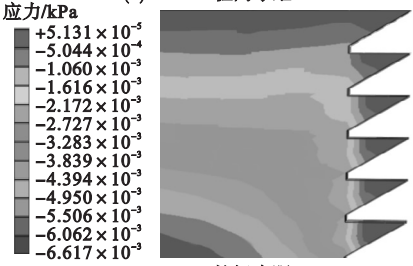
利用 ABAQUS 对模型进行后处理分析后,可得到不同桩间净距下板后竖向土应力的应力分布云图(见图 7).通过 ABAQUS 数据提取功能,提取不同桩间距板后竖向土应力的结点数值,最终可以绘制板后竖向土应力随悬臂段深度变化曲线(见图 8).



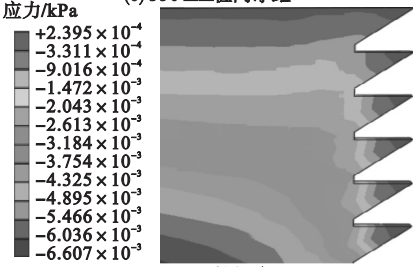
(a) 250 mm桩间净距



(b) 300 mm桩间净距



(c) 350 mm桩间净距



(d) 400 mm桩间净距

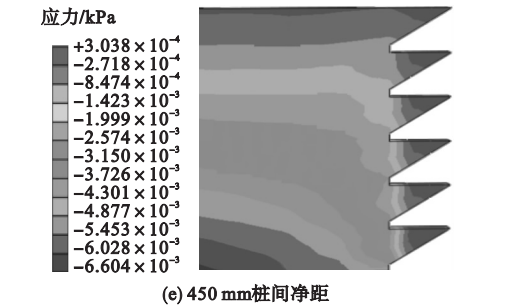


图 7 板后竖向土压力

Fig. 7 Post-plate vertical soil pressure

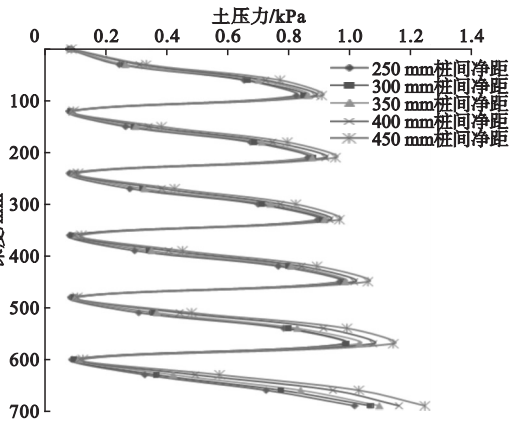


图 8 板后竖向土压力 $Q-S$ 曲线

Fig. 8 $Q-S$ curve of post-plate vertical soil pressure

由图 7、图 8 可知:板后竖向土应力在同一深度处随着桩间距的增大逐渐增大;并且其随着深度的增大呈递增趋势。

2.4 板后土体沿板长方向的分布作用

利用 ABAQUS 软件后处理分析计算后,通过切换观察视图,查看土体中某一深度处的情况,即可查得板厚的摩擦土拱(见图 9)。

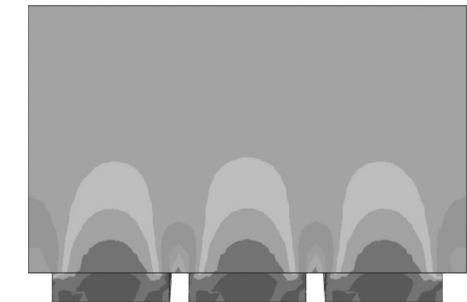
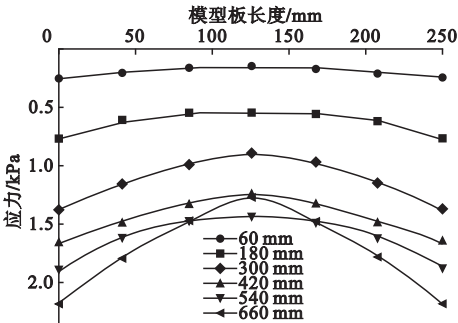


图 9 板后摩擦土拱

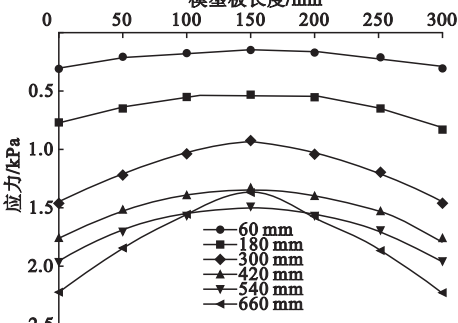
Fig. 9 Post-plate friction of soil arch

利用 ABAQUS 软件后处理分析计算后,

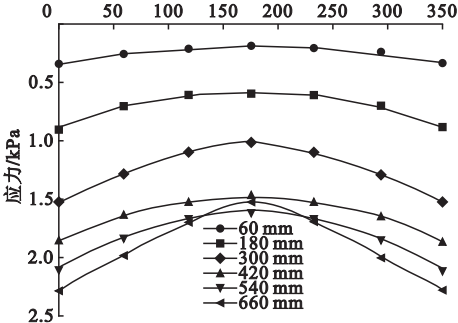
分别提取出各桩间净距下模型板深度为 660 mm、540 mm、420 mm、300 mm、180 mm、60 mm 处不同水平位置下的结点数,绘制出应力沿模型板长度方向的分布曲线(见图 10)。



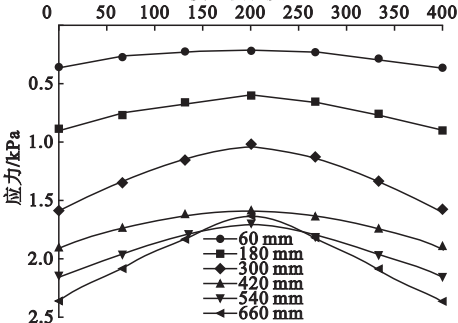
(a) 250 mm 桩间净距



(b) 300 mm 桩间净距



(c) 350 mm 桩间净距



(d) 400 mm 桩间净距

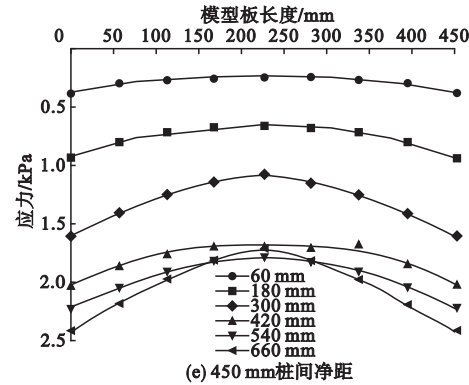


图 10 板后水平土压力

Fig. 10 Post-plate horizontal soil pressure

由图 9、图 10 可知:板后摩擦土拱效应随

着板后 Y 方向呈逐渐减弱趋势;同一桩间距下,板后水平土应力随着模型板深度的增加而逐渐增大;同一板后深度的情况下,板后水平土应力随着桩间距的增大也呈现递增趋势.

2.5 模型桩应力分析

利用 ABAQUS 对模型进行后处理分析,可得到不同桩间距距下模型桩应力云图(见图 11). 经过 ABAQUS 软件分析计算后,通过 ABAQUS 数据提取功能,提取不同桩间距桩结构受力的结点数,最终可以绘制桩结构受力曲线(见图 12).

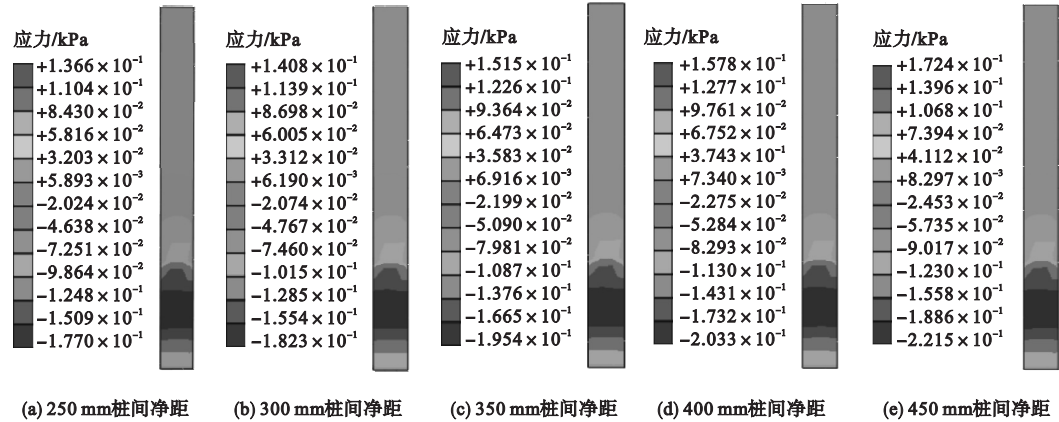


图 11 桩应力云图

Fig. 11 Pile stress contour plot

一桩间距下,桩应力随着深度的增加呈现递增趋势.

2.6 模型板应力分析

利用 ABAQUS 对模型进行后处理分析后,即可得到不同桩间距距下模型板应力云图(见图 13).

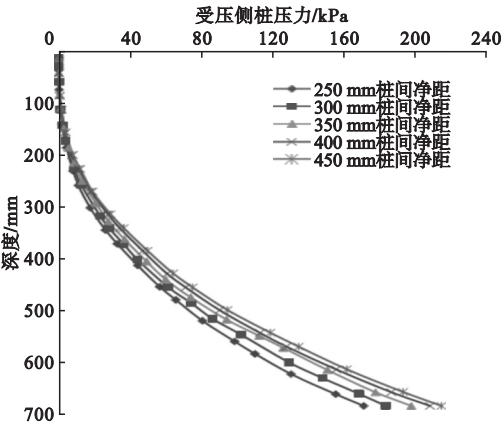
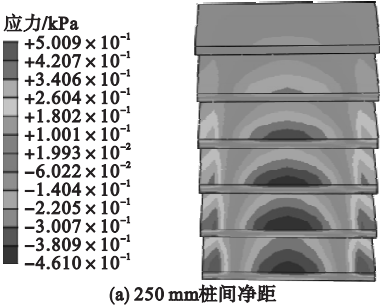


图 12 桩结构受力曲线

Fig. 12 Stress curves of pile structure

由图 11、图 12 可知:模型桩应力在同一深度处随着桩间距的增大呈现递增趋势;同



(a) 250 mm 桩间距

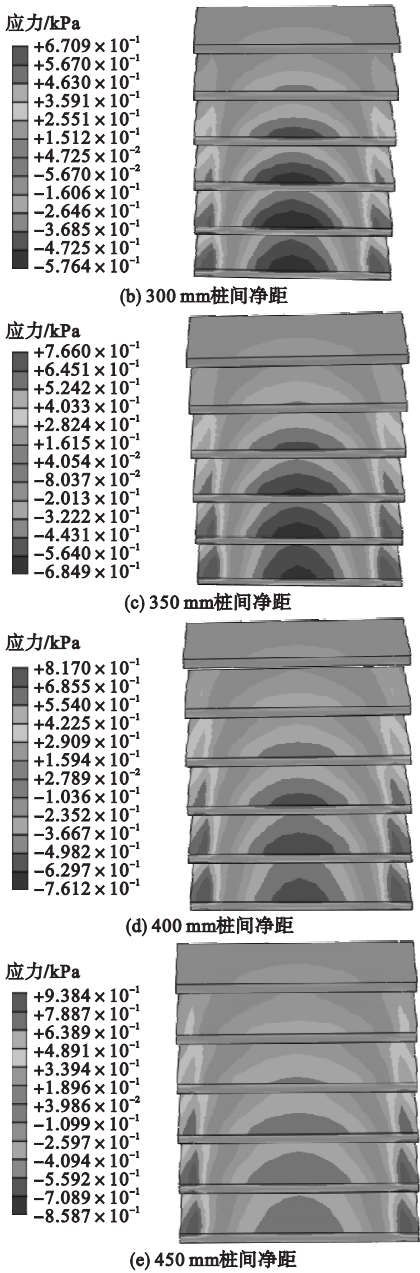


图 13 板应力云图

Fig. 13 Plate stress plot

经过 ABAQUS 软件分析计算后,通过 ABAQUS 数据提取功能,提取不同桩间距板结构受力的结点数,最终可以绘制板结构受力曲线(见图 14、图 15)。

由图 13、图 14、图 15 可知:板应力云图随着桩间距的增大呈现递增趋势;板两端受力在同一深度处随着桩间距的增大而增大;同一桩间距下,板两端受力随着深度的增加

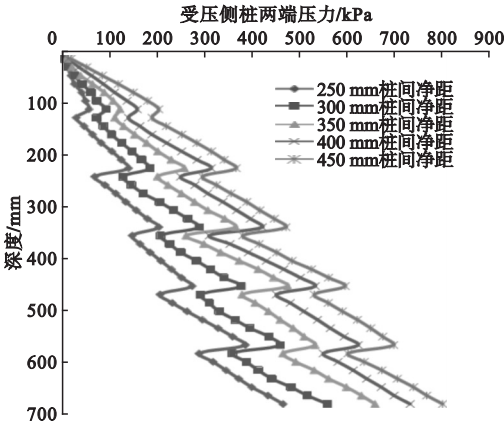


图 14 板两端受力曲线

Fig. 14 Stress curves of plate structure on the both ends of the plate

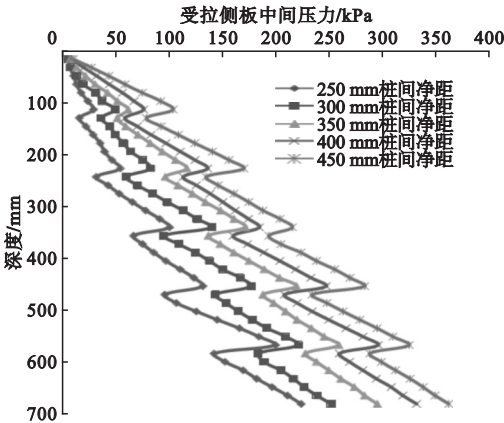


图 15 板中间受力曲线

Fig. 15 Stress curves of plate structure in the middle of the plate

呈现递增趋势;板中间受力在同一深度处随着桩间距的增大而增大;同一桩间距下,板中间受力随着深度的增加呈现递增趋势。

3 结 论

- (1) 桩间距越大,斜插板上的应力越大;Mises 应力随着桩间距的增大也在不断增大。
- (2) 桩后土应力随着深度的增大而增大;桩后土应力在同一深度下随着桩间距的增大也在不断增大。
- (3) 板后水平土应力在同一深度处随着桩间距的增大逐渐增大;板后摩擦土拱效应随着板后 Y 方向呈逐渐减弱趋势。

(4)模型桩应力在同一深度处随着桩间距的增大呈现递增趋势;同一桩间距下,桩应力随着深度的增加呈现递增趋势。

(5)板应力云图随着桩间距的增大呈现递增趋势;板两端受力在同一深度处随着桩间距的增大而增大;板中间受力在同一深度处随着桩间距的增大而增大。

参考文献

- [1] 陈雷.斜插式桩板墙的设计与应用[J].路基工程,2012(6):144-146.
(CHEN Lei. Design and application of sheet-pile retaining wall with prefabricated panels trough[J]. Subgrade engineering, 2012(6): 144-146.)
- [2] 陈雷.桩板式挡土墙在公路、市政工程中的优化研究[J].公路,2017,62(5):34-38.
(CHEN Lei. Optimization of pile type retaining wall in highway and municipal engineering[J]. Highway, 2017, 62(5): 34-38.)
- [3] 姜楠楠.斜插式桩板墙的设计理论与应用研究[D].昆明:云南大学,2012.
(JIANG Nannan. Study on the design theory and application of slab-pile wall[D]. Kunming: Yunnan University, 2012.)
- [4] 李光明.斜插式桩板墙与锚索桩复合支护结构在特殊土高边坡支护中的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(5):54-56.
(LI Guangming. Application of oblique-inserted pile-slab wall and anchor pile composite supporting structure in special soil high-slope support[J]. Journal of highway and transportation research and development (application technology edition), 2014, 10(5): 54-56.)
- [5] 速玉刚.挂板式斜插桩板墙结构受力机理研究[D].昆明:云南大学,2016.
(SU Yugang. Study on the stress mechanism of slab-pile wall[D]. Kunming: Yunnan University, 2016.)
- [6] 屈俊童,字晓雷.斜插式桩板墙中的钢筋定位技术研究[J].路基工程,2018(5):154-157.
(QU Juntong, ZI Xiaolei. Study on reinforced positioning technology in slab-pile wall[J]. Subgrade engineering, 2018(5): 154-157.)
- [7] SHERIF M. Earth pressures behind rotating and non-yielding walls[J]. Geotechnical engineering, 1984(3): 67-70.
- [8] BOSSCHIER J, GRAY H. Soil arching in sandy slopes[J]. Journal of geotechnical engineering, 1986, 112(6): 626-645.
- [9] 吴汉辉.埋入式抗滑桩模型试验及其工作机理研究[D].重庆:重庆大学,2004.
(WU Hanhui. Study on tests of sunken piles and their mechanism[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.)
- [10] TERZAGHI K. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1943.
- [11] HANDY R L. The arch in soil arching[J]. Journal of geotechnical engineering, 1985, 111(3): 3.
- [12] KINGSLEY H W. Arch in soil arching[J]. Journal of geotechnical engineering, 1989(2): 112-115.
- [13] CHEN Baoguo, JIAO Junjie, DING Baosong, et al. Numerical simulation on soil arch effect and load reduction mechanism using EPS of high fill culvert[J]. Applied mechanics and materials, 2014(701/702): 879.
- [14] 赵俭斌,孙哲,张传远,等.现浇混凝土大直径管桩群桩水平土拱效应[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(6):1029-1036.
(ZHAO Jianbin, SUN Zhe, ZHANG Chuan-yuan, et al. Research on horizontal soil arching of large diameter cast-in-situ concrete pipe pile group[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(6): 1029-1036.)
- [15] 字晓雷,屈俊童,段自侠,等.斜插式桩板墙力学性能试验研究[J].路基工程,2019(1): 76-79.
(ZI Xiaolei, QU Juntong, DUAN Zixia, et al. Experimental research on mechanical properties of oblique inserted slab pile wall[J]. Subgrade engineering, 2019(1): 76-79.)
- [16] 朱加荣,陈雷,屈俊童,等.挂板斜插式桩板墙土压力分布模式试验研究[J].路基工程,2017(6):81-84.
(ZHU Jiarong, CHEN Lei, QU Juntong, et al. Experimental study on distribution mode of soil pressure of oblique-inserting slab-pile wall of hanging slab[J]. Subgrade engineering, 2017(6): 81-84.)
- [17] 蒲德红,翟文光,周敬程.斜插式桩板墙在公路边坡中的应用分析[J].路基工程,2016(1):137-141.
(PU Dehong, YAO Wenguang, ZHOU Jingcheng. Analysis of application of oblique-inserting slab-pile wall in road slope[J]. Subgrade engineering, 2016(1): 137-141.)
- [18] 张敏江,赵乃志,杨军彩,等.浸水重力式挡土墙的滑移分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2005,21(1):5-7.
(ZHANG Minjiang, ZHAO Naizhi, YANG Juncai, et al. Analysis of the anti-slide stability of the gravity retaining wall[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2005, 21(1): 5-7.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)