

文章编号:1673-2049(2018)06-0111-07

考虑土拱效应的斜插式桩板墙合理板间距研究

屈俊童, 吴绍山, 许展峰, 陈慧君

(云南大学 建筑与规划学院, 云南 昆明 650504)

摘要:结合高速公路边坡实际工程,采用 ABAQUS 有限元软件进行三维数值模拟分析;从考虑板间土拱效应的角度出发,研究了 0.2 倍板宽、0.3 倍板宽、0.4 倍板宽、0.5 倍板宽 4 组不同板间距下斜插式桩板墙的板后水平土压力、板后竖向土压力以及板间土拱强度沿横向的变化规律,并结合结构实用性和安全性,提出了斜插式桩板墙的合理板间距取值范围、板间土拱的拱脚位置以及拱顶参数关系。结果表明:斜插式桩板墙在悬臂段中下部相邻板间以板底作为拱脚形成板间竖向土拱,且板后土压力随深度表现为锯齿状分布,水平土压力小于经典库仑主动土压力,竖向应力大于土体自重应力;板间土拱的拱脚位于斜插板板底,在设计施工时应进行局部加强以提高设计强度;当板间距取 0.3 倍~0.4 倍板宽时,板间土拱效应明显,板后土压力较小,建议斜插式桩板墙合理的板间距取值为 0.3 倍~0.4 倍板宽;所得结论有助于斜插式桩板墙结构的进一步优化设计,并产生显著的经济效益和社会效益。

关键词:桩板墙;土拱效应;土压力;合理板间距;数值模拟

中图分类号:U417.1

文献标志码:A

Study on Reasonable Plate Spacing of Oblique Sheet-pile Wall Considering Soil Arching Effect

QU Jun-tong, WU Shao-shan, XU Zhan-feng, CHEN Hui-jun

(School of Architecture and Urban Planning, Yunnan University, Kunming 650504, Yunnan, China)

Abstract: Combined with the practical engineering of a highway slope, the three-dimensional numerical simulation analysis was carried out by ABAQUS finite element software. From the angle of soil arch effect, the variation law of post-plate horizontal earth pressure, post-plate vertical earth pressure and inter-plate soil arch strength along the transverse direction of oblique wall with 0.2 times plate width, 0.3 times plate width, 0.4 times plate width and 0.5 times plate width were studied. Combining the practicability and safety of structure, the reasonable range of plate spacing, the position of the arch foot of the inter-plate soil arch and the relation of vault parameters were put forward. The results show that the oblique pile-sheet wall has a vertical soil arch between the adjacent plates in the middle and lower part of the cantilever section with the bottom of the plate as the arch, and the post-plate earth pressure is serrated with depth. The horizontal earth pressure is less than the classical Coulomb active earth pressure and the vertical stress is greater than the weight stress of the soil. The arch foot of the inter-plate soil arch is located at bottom of the oblique plate, and the local reinforcement should be carried out in the design and construction to improve the designed strength. When the plate spacing is 0.3 times-

收稿日期:2017-12-28

基金项目:昆明市科学基金项目(2015-1-G-01089)

作者简介:屈俊童(1978-),男,云南丽江人,教授,工学博士,E-mail:qujuntong@126.com。

0.4 times of the plate width, the soil arch effect is obvious and the post-plate soil pressure is small, so the reasonable spacing of the slanted pile plate wall is 0.3 times to 0.4 times of the plate width. The conclusion is helpful for further optimization design of oblique sheet-pile wall structure, and will has significant economic and social benefits.

Key words: sheet-pile wall; soil arch effect; earth pressure; reasonable plate spacing; numerical simulation

0 引言

进入 21 世纪以来,随着人们对居住环境要求越来越高,传统桩板墙无法解决绿化的劣势日益突出。于是在 2008 年左右中国最早设计出了斜插式桩板墙,该新型支挡结构最大的特点在于将桩后直板改为了桩间斜板,这种改变不仅能满足基本支护要求,使墙后空隙水自由排出,减小挡土板后土压力,而且排出的地下水还能对绿化槽内的植物提供水分。这样结构在基本支挡功能基础上又增加了植物护坡、降低噪声、调节小气候以及景观绿化等众多功能特点,使得结构功能更加丰富、结构形式更加合理,达到了工程应用与美化环境有机结合的目的^[1]。

斜插式桩板墙虽然是由传统桩板墙支护结构发展而来,但是由于其桩间挡板倾斜,加之桩间、板间土拱效应作用,导致该结构在受力以及墙后土压力分布模式上存在较大差异。张燕^[2]对斜插式桩板墙挡土板的设计方法、挡土板的最优角度以及考虑卸载拱下的土压力分布情况等进行了研究和阐述;陈雷^[3]对斜插式桩板墙的经济效益、设计计算需注意的要点以及该结构的应用前景进行了分析;李光明^[4]结合某小区边坡工程情况,提出了斜插式桩板墙与锚索桩共同作用的支护方案,并对其治理效果进行了评价;蒲德红等^[5]论述了固支板和简支板情况下挡土板受力计算方法,并对斜插式桩板墙的施工工艺和施工难点进行了阐述。

综上所述,斜插板作为整个斜插式桩板墙的一部分,其研究显得相对较少,尤其是在板间距变化对板间土拱的强度、墙后土压力分布模式的影响以及如何确定合理板间距等问题上鲜有研究。

1 土拱效应与研究背景

土拱效应是岩土工程领域的常见现象。1884 年,英国科学家 Roberts 通过“粮仓效应”首次发现了土拱效应,并指出土拱效应表征了介质由于产生相对位移而出现类似拱圈的现象^[6-7]。土拱的形成改变了介质的应力状态,造成应力重分布后,把拱圈

上的应力传递到拱脚或周围稳定介质中去^[8]。

1943 年, Terzaghi^[9]通过活动门试验提出了土拱效应的存在条件:①土体间产生不均匀位移或相对位移;②存在作为支撑的拱脚。

斜插式桩板墙在城市公园、重要的高速路、铁路等对环境要求较高的地区具有广泛的应用前景,其应用效果图如图 1(a)所示。由于担心发生板间土体挤出、桩顶土体沉陷等问题,现有工程的挡土板布置方式大多采用上下相邻板平齐的形式,如图 1(b)所示。在这种布置方式下,出现了植物成活率低、绿化效果差、墙后孔隙水压力得不到有效释放等问题,为有效提高绿化效果,降低工程造价,找出一个合理的板间距成为了必须要面对的问题。对于斜插式桩板墙而言,首先,由于板间距的增大,必然会引起相邻板间土体的不均匀变形,其次,倾斜挡土板板底为土拱效应的产生提供了固定拱脚,充分说明了斜插式桩板墙相邻板间具备了土拱效应产生的必要条件^[10-14]。基于此,本文从考虑板间土拱效应的角度出发,在固定桩间距、板的倾角等前提下,通过 ABAQUS 对 4 组不同板间距下的斜插式桩板墙板后水平土压力、板后竖向土压力以及板间土拱强度沿横向的变化规律等进行模拟分析,并最终结合实用性和安全性,提出斜插式桩板墙合理板间距的取值范围。

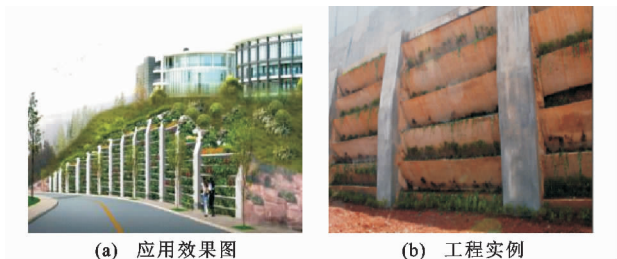


图 1 斜插式桩板墙

Fig. 1 Oblique Sheet-pile Wall

2 模型与参数选取

昆明市茶马花街边坡支挡工程路堑土体主要由杂填土、第三系黏性土、含碎石角砾粉质黏土以及中

风化岩组成,抗滑桩长 20 m,桩间距 6 m。为了方便计算,结合地质资料,按照缩尺比 1:20 将实际工程相应尺寸缩小,地层简化为黏土和中风化岩层后进行模拟研究,本构关系采用理想弹塑性模型,屈服准则采用摩尔-库仑屈服准则^[15],为保证分析结果的精确性,网格划分时需对斜插板和板后土体进行加密,材料单元类型选择八节点线性六面体实体单元,积分方法为减缩积分(C3D8R)^[16]。4 组模型板间距见表 1,相关模型尺寸见图 2,计算参数见表 2,计算分析模型见图 3。

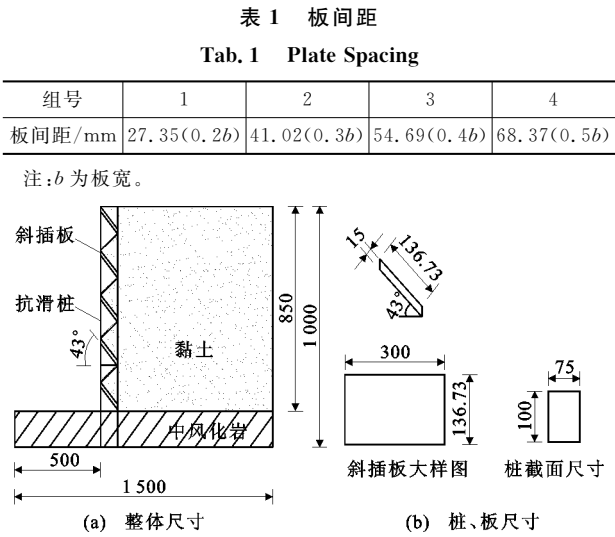


图 2 模型尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Model Sizes (Unit:mm)

表 2 模型计算参数

Tab. 2 Calculation Parameters of Model

材料	密度 γ ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\Phi/(\text{^\circ})$
黏土	1.98	24	0.27	18.2	20.0
桩、板	2.50	31 000	0.22		
中风化岩	2.41	21 000	0.29	19.2	38.5

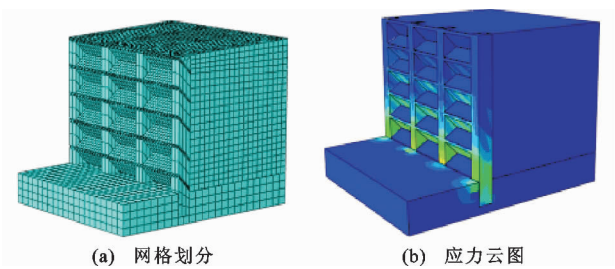


图 3 计算分析模型

Fig. 3 Computational Analysis Model

3 计算结果分析

3.1 板后水平土压力分析

利用 ABAQUS^[2-3,9,16-17] 创建显示组功能,得到

4 组不同板间距下土体的 S22(*y* 方向)应力云图如图 4 所示,并沿板后跨中提取板顶、板中、板底三处土体的水平土压力值绘制出水平土压力随深度变化曲线,为方便进行对比分析,将板中水平土压力与经典库仑主动土压力一同绘制于曲线中,如图 5 所示。板中水平土压力值见表 3。

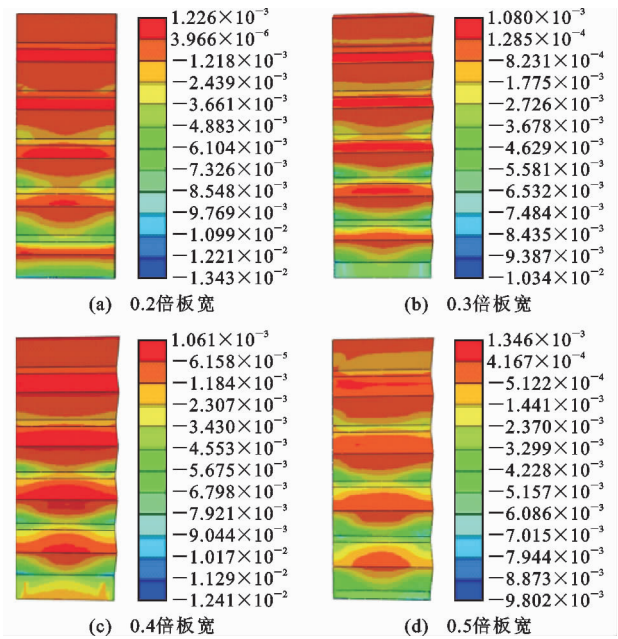


图 4 水平土压力(单位:kPa)

Fig. 4 Horizontal Earth Pressure (Unit:kPa)

从图 5 和表 3 可以看出^[17-20]:

- (1)由于挡土板倾斜,使得斜插式桩板墙板后水平土压力整体呈现为特殊的锯齿状,并且随着深度的增加,板后水平土压力不断增大。
- (2)板后水平土压力整体上均小于库仑主动土压力,且随着板间距的增大,悬臂段中下部水平土压力不断减小,这是由于随着挡土板板间距的不断增大,板后土体相对位移不断增大,土体应力发生偏转,在相邻板间形成了竖向土拱,限制了水平土压力的横向传递。
- (3)在 0.2 倍板宽板间距模型中,板中水平土压力在悬臂段中部微弱减小后又在桩底呈现出增长趋势,说明此时的板间距还不足以使抗滑桩悬臂段底部土体产生较大的相对位移,因而土拱效应发挥还不明显。
- (4)在 0.3 倍板宽板间距模型中,板底水平土压力整体上较 0.2 倍板宽板间距模型有了明显的减小,且随着深度的增加,板中水平土压力逐渐减小并明显出现回收趋势,说明在此板间距下,板后土体相对位移有所增大,且板间土拱效应随深度的增加而

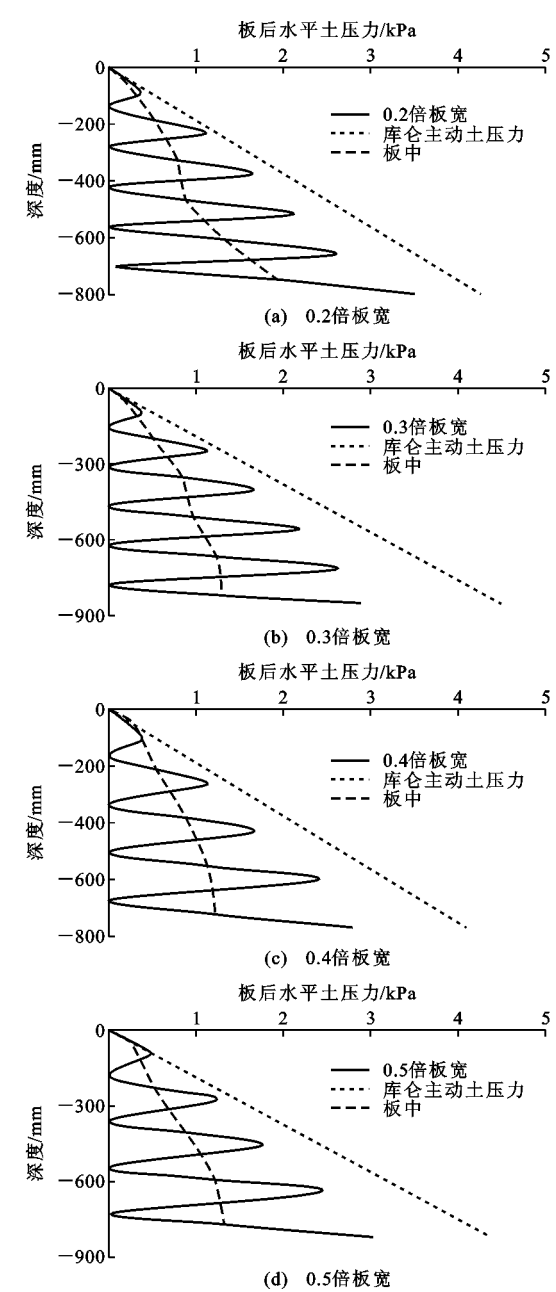


图 5 板后水平土压力随深度变化曲线
Fig. 5 Change Curves of Post-plate Horizontal Earth Pressure with Depth

不断增强,该规律与传统桩间土拱效应随深度的变化规律是相一致的^[16,18]。

(5)0.4 倍板宽板间距模型与 0.3 倍板宽板间距模型相比,板底水平土压力持续微弱减小,板中水平土压力随深度增加回收趋势更加明显。另外,在同一深度下,板中水平土压力整体相较于 0.3 倍板宽板间距模型进一步减小,且小于板底水平土压力最大值的 1/2,充分说明了水平土压力的横向传递受到了板间土拱的有效限制,板间土拱效应进一步增强。

表 3 板中水平土压力

Tab. 3 In-plate Horizontal Earth Pressure

0.2 倍板宽		0.3 倍板宽		0.4 倍板宽		0.5 倍板宽	
深度/ mm	土压力/ kPa	深度/ mm	土压力/ kPa	深度/ mm	土压力/ kPa	深度/ mm	土压力/ kPa
-47	-0.186	-47	-0.186	-47	-0.277	-47	-0.250
-190	-0.531	-200	-0.526	-216	-0.556	-228	-0.531
-330	-0.790	-355	-0.851	-385	-0.898	-409	-0.892
-470	-0.904	-510	-0.984	-554	-1.140	-590	-1.221
-610	-1.343	-665	-1.243	-723	-1.234	-771	-1.334
-750	-1.936	-820	-1.310				

(6)0.5 倍板宽板间距模型中,虽然板底水平土压力有所减小,但是板中水平土压力相较于 0.4 倍板宽板间距模型几乎不再减小,这说明土拱效应的进一步提高对板中水平土压力的减小起到的作用已经不明显。

从水平土压力分析中可以看出:斜插式桩板墙在 0.3 倍~0.4 倍板宽板间距下产生的板间土拱效应最强,板后所受的水平土压力最小。

3.2 板后竖向土压力分析

同样,利用 ABAQUS 创建显示组功能,得到 4 组不同板间距下土体的 S33(z 方向)应力云图如图 6 所示,相应的竖向土压力与自重应力随深度变化曲线如图 7 所示,板底竖向土压力值见表 4。

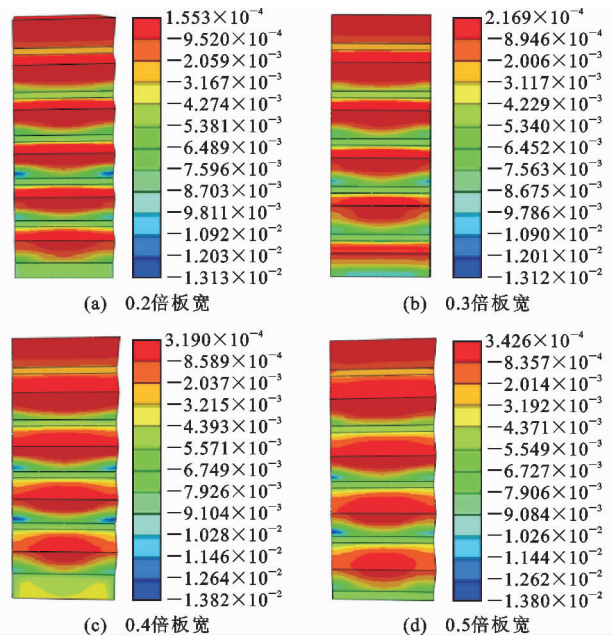


图 6 竖向土压力(单位:kPa)
Fig. 6 Vertical Earth Pressure (Unit:kPa)

从图 7 和表 4 可以看出:

(1)不同板间距下板后竖向土压力在桩顶与土体自重应力基本相同,悬臂段中下部板后竖向土压

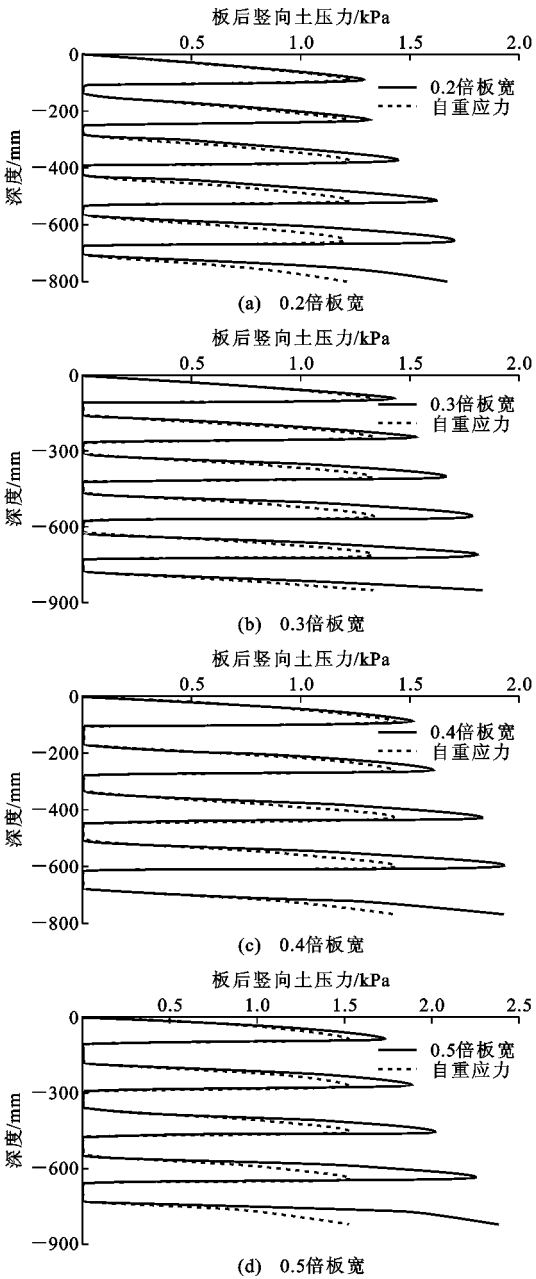


图 7 板后竖向土压力随深度变化曲线
Fig. 7 Change Curves of Post-plate Vertical Earth Pressure with Depth

力在不同程度上大于土体的自重应力。

(2)与水平土压力一样,由于挡土板倾斜,斜插式桩板墙板后竖向土压力整体也呈现为锯齿状。

(3)板底竖向土压力随着深度的增加不断增大,说明板底除了受到了土体的自重应力外,还受到来自以板底作为拱脚的板间土拱所传递的拱后土压力。

(4)板中的竖向土压力只比自重应力略大,而板底的竖向土压力最大值比自重应力增大了近 1 倍,进一步说明了拱脚作用区域为斜插板板底。

(5)在 0.2 倍板宽板间距下,悬臂段中下部板底

表 4 板底竖向土压力

Tab. 4 Bottom-plate Vertical Earth Pressure

0.2 倍板宽		0.3 倍板宽		0.4 倍板宽		0.5 倍板宽	
深度/ mm	土压力/ kPa	深度/ mm	土压力/ kPa	深度/ mm	土压力/ kPa	深度/ mm	土压力/ kPa
-93	-1.290	-93	-1.437	-93	-1.510	-93	-1.731
-235	-1.325	-248	-1.531	-262	-1.614	-275	-1.893
-377	-1.457	-403	-1.665	-431	-1.835	-457	-2.025
-519	-1.625	-558	-1.785	-600	-1.932	-639	-2.252
-660	-1.703	-713	-1.819	-769	-1.942	-821	-2.396
-800	-1.712	-850	-1.832				

的竖向土压力呈现出先增加后减小的趋势,说明此时板间距较小,悬臂段底部的土拱效应还不明显。

(6)从 0.3 倍板宽板间距模型开始,板底的竖向土压力明显增强,相比水平土压力减小值更为明显,但是 0.4 倍板宽板间距模型第 5 块板底竖向土压力与自重应力差值最大为 0.6 kPa 左右,而 0.5 倍板宽板间距模型的差值仅略微增大为 1 kPa,说明在此板间距下,板间土拱效应强度提高并不明显或拱体已经破坏。

因此,从竖向土压力分析中可以进一步得出:斜插式桩板墙在 0.3 倍~0.4 倍板宽板间距下产生的板间土拱效应达到最强,且板间土拱拱脚位于板底位置。

3.3 板间土拱强度分析

利用 ABAQUS 视图切片得到 4 组模型中间跨板后 Von Mises 应力云图,如图 8 所示。

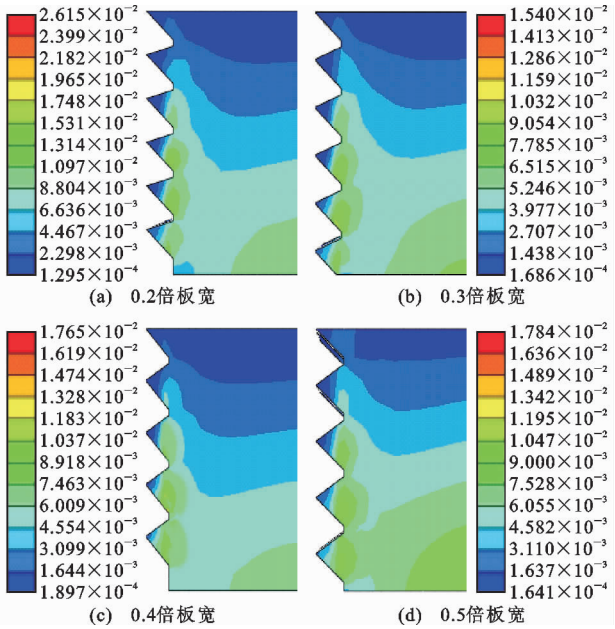


图 8 板后土拱应力云图(单位:kPa)
Fig. 8 Post-plate Soil Arch Stress Cloud (Unit:kPa)

从图 8 可以看出,在悬臂段中下部形成了明显的板间竖向土拱,且随着深度的增加,拱高逐渐变大,其分布规律与前面土压力分析结果一致。为进一步了解板间土拱强度随板间距变化的规律,提取不同深度土拱位置处沿土体横向(y 方向)应力值进行对比分析,如图 9 所示,4 组模型板后拱高和应力最大值如表 5 所示。

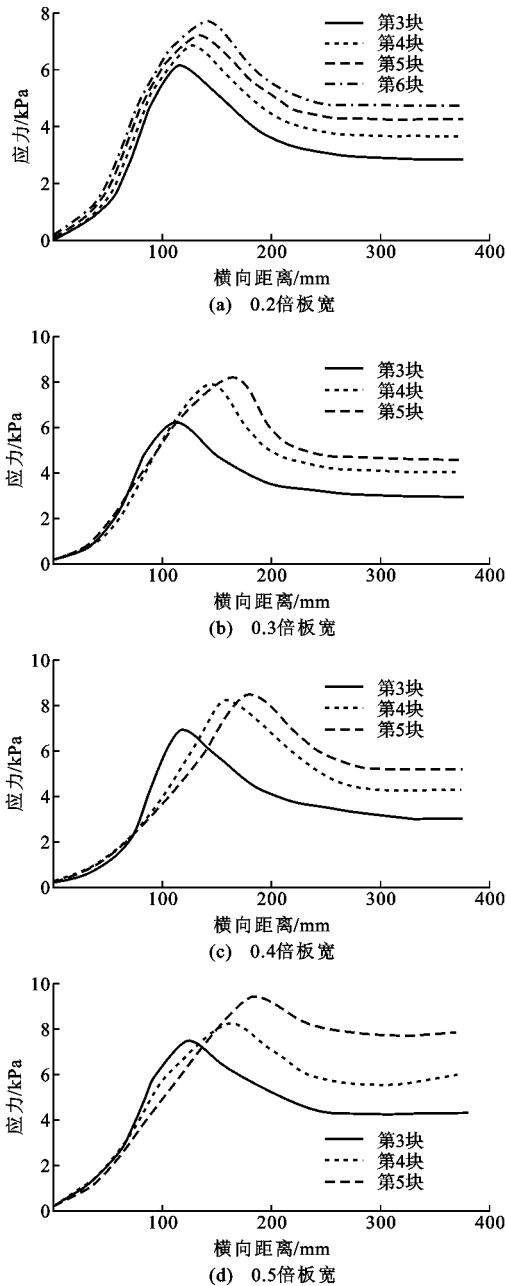


图 9 板后土拱应力值

Fig. 9 Post-plate Soil Arch Stress Intensity

从图 9 和表 5 可以看出:

(1)从板顶开始向后,应力迅速增大到拱顶时,在土拱效应影响范围外减小并趋于平稳,且随着深度的增加,稳定后的应力值也增加。

表 5 拱高和应力最大值

Tab. 5 Maximum Values of Arch Height and Stress

板间距	0.2 <i>b</i>	0.3 <i>b</i>	0.4 <i>b</i>	0.5 <i>b</i>
拱高/mm	43	66	79	83
应力最大值/kPa	7.669	8.159	8.455	9.384

(2)随着深度的增加,最大应力值逐渐提高,并出现向后移动现象,说明此时板间土拱的拱高逐渐变大,土拱效应不断增强。

(3)板间距在 0.3 倍~0.4 倍板宽时拱顶高度和应力值几乎已经达到最大值,说明此板间距下斜插式桩板墙板间土拱效应最强。

4 结 语

(1)由于挡土板倾斜,使得斜插式桩板墙板后水平和竖向土压力均呈现锯齿状分布,且在板间土拱作用下,水平土压力小于经典库仑主动土压力,竖向应力大于土体自重应力。

(2)板间土拱效应主要出现在抗滑桩悬臂段中下部,且随深度的增加,土拱效应不断增强。

(3)板间土拱的拱脚位于斜插板板底,在设计施工时应进行局部加强,提高设计强度。

(4)板间距在 0.3 倍~0.4 倍板宽时,板中土压力最小,拱高与拱顶应力值最大,板间土拱效应达到最强。因此,结合结构的安全性和适用性,建议斜插式桩板墙合理的板间距取值为 0.3 倍~0.4 倍板宽。

参考文献:

References:

[1] 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(5): 34-38.
CHEN Lei. Optimization of Pile Type Retaining Wall in Highway and Municipal Engineering[J]. Highway, 2017(5): 34-38.

[2] 张 燕. 斜插式桩板墙在边坡支护中的运用[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
ZHANG Yan. The Application of Sheet-pile Retaining Wall with Prefabricated Panels Trough in Slope[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.

[3] 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 Wall with Prefabricated Panels Trough[J]. Subgrade Engineering, 2012(6): 144-146.

[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(5): 54-56.

- LI Guang-ming. 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(5): 54-56.
- [5] 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 De-hong, ZHAI Wen-guang, ZHOU Jing-cheng. Analysis of Application of Oblique-inserting Slab-pile Wall in Road Slope[J]. Subgrade Engineering, 2016(1): 137-141.
- [6] 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.
- [7] 郑学鑫. 抗滑桩桩间土拱效应及其有限元模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
ZHENG Xue-xin. Analysis and Simulation of Soil Arching Effects on Anti-slide Piles [D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [8] 商秋婷, 刘祚秋, 林治平. 悬臂桩挡土板对桩板后土拱效应的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 333-339.
SHANG Qiu-ting, LIU Zuo-qiu, LIN Zhi-ping. Influence of Breast Board of Cantilever Piles on Soil Arching Effect Behind Piles and Plane[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 333-339.
- [9] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [10] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
FEI Kang, ZHANG Jian-wei. Application of ABAQUS in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010.
- [11] 胡俊强. 双排桩土拱效应及嵌固段受力特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
HU Jun-qiang. Study on the Effect of Soil Arching and Mechanical Behavior of Socketed Segment on Double Row Piles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [12] 吴建川. 典型堆积层滑坡抗滑桩土拱形成机理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
WU Jian-chuan. Formation Mechanism of Soil Arch of Anti-slid Piles in Accumulation Landslide[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [13] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
SHI Yi-ping, ZHOU Yu-rong. ABAQUS Finite Element Analysis Example and Illustration[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [14] 王广军. 桩板墙工程土拱效应及合理桩间距研究——以西攀高速公路为实验线[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
WANG Guang-jun. Study of Soil Arching Effects of Sheet-pile Wall and Appropriate Space Between Piles — Take Xi-Pan Highway as an Example[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [15] 巨能攀, 黄润秋, 涂国祥. 桩板墙桩土作用机理有限元分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33(4): 365-370.
JU Neng-pan, HUANG Run-qiu, TU Guo-xiang. The FEM Study on Interaction Mechanism Between the Pile and the Rock Soil of the Sheet Pile Wall[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2006, 33(4): 365-370.
- [16] 费康, 陈毅, 王军军. 桩承式路堤土拱效应发挥过程研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1367-1374.
FEI Kang, CHEN Yi, WANG Jun-jun. Study of Development Soil Arching Effect in Piled Embankment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(5): 1367-1374.
- [17] 黄治云, 张永兴, 董捷. 桩板墙土拱效应及土压力传递特性试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1887-1892.
HUANG Zhi-yun, ZHANG Yong-xing, DONG Jie. Experimental Study of Soil Arching and Transfer Behavior of Earth Pressure About Sheet-pile Walls[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1887-1892.
- [18] 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, 27(3): 364-369.
LIU Jin-long, WANG Ji-li, YUAN Fan-fan. Influence of Layout Style on Soil Arching Effect of Double-row Anti-slide Piles [J]. Journal of Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2010, 27(3): 364-369.
- [19] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI Guang-xin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [20] 房锐. 公路边坡治理工程效果评价系统研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2009.
FANG Rui. Study on Evaluation System for Project Efficiency of Highway Slope Treatment Project[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2009.