

文章编号: 1673-9469(2018)02-0011-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.02.003

垂直护岸板桩桩身变形数值模拟研究

莫倩倩^{1,2}, 高磊^{1,2}, 陈永辉¹, 杨凯¹, 刘伟³

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 连云港市水利规划设计院有限公司, 江苏连云港 222003)

摘要: 采用有限元软件 ABAQUS, 建立垂直护岸板桩数值分析模型, 研究板桩的弹性模量、波浪的波高和波长对桩身水平位移的影响。研究表明: 垂直护岸板桩向临水侧位移, 随着桩的入土深度增加, 桩身位移先增大后减小, 在深度 13 m 以下位移较小。板桩的弹性模量对桩身水平位移的影响较小, 在其它条件相同的情况下, 随着板桩的弹性模量增大, 桩身水平位移从桩顶到深度为 13 m 处逐渐减小, 弹性模量对深度 13 m 以下的板桩水平位移影响较小。波浪的波高和波长对深度 0 m 到 13 m 范围内板桩的水平位移影响较大, 对深度 13 m 以下的板桩水平位移影响较小。在其它条件相同的情况下, 随着波高的增大, 桩身最大位移点处的深度逐渐增大, 桩身水平位移从桩顶到深度为 13 m 处逐渐减小。随着波长的增大, 桩身水平位移从桩顶到深度为 13 m 处逐渐减小。

关键词: 板桩; 有限元; 水平位移; 弹性模量; 波高; 波长

中图分类号: TV3

文献标识码: A

Numerical simulation study on the deformation of vertical revetment sheet pile

MO Qianqian^{1,2}, GAO Lei^{1,2}, CHEN Yonghui¹, YANG Kai¹, LIU Wei³

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering of Ministry of Education, Hohai university, Jiangsu Nanjing, 210098, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China; 3. Lianyungang Planning and Design Institute of Water Conservancy Co Ltd, Lianyungang, 222003, China)

Abstract: In this paper, a numerical model of the vertical revetment sheet pile is established by using the finite element software ABAQUS, the effects of elastic modulus of the sheet pile, wave height and wavelength on the horizontal displacement of the pile body are studied. The results show that the vertical revetment sheet pile moves to the side of water, the displacement of the pile increases firstly and then decreases with the depth of pile increasing. The displacement is small below the depth of 13m. The elastic modulus of pile has little effect on the displacement of the pile. Under the same conditions, as the elastic modulus of pile increases, the horizontal displacement of pile from the pile top to a depth of 13m gradually decreases, the elastic modulus has little influence on the horizontal displacement of sheet pile below the depth of 13m. Wave height and wavelength have great influence on the horizontal displacement of the pile at the depth range from 0m to 13m, and they have little influence on the horizontal displacement of sheet pile below the depth of 13m. Under the same conditions, with increasing of wave height, the depth at the maximum displacement point of pile increases gradually, the horizontal displacement of the pile from the pile top to the depth of 13m decreases gradually. With increasing of wavelength, the horizontal displacement of the pile from pile top to the depth of 13m decreases gradually.

Key words: Sheet pile, finite element, horizontal displacement, elastic modulus of the sheet pile, wave height, wavelength

收稿日期: 2017-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508159); 水利部公益性行业科研专项(201501043); 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金资助项目(SLK2015A01)

作者简介: 莫倩倩(1993-), 女, 浙江湖州人, 硕士, 从事桩基础方面的研究。

垂直护岸板桩结构是通过在航道两岸临水侧打设直立式的钢筋混凝土预制板桩或钢板桩所构成的连续墙围护结构,与传统的重力式护岸相比,垂直板桩护岸不仅具备挡土、防渗、抗冲刷的功能,更具有材料用量省、开挖量小、施工便捷等优势,被广泛应用于水利工程中。王元战等建立波浪荷载作用下格型钢板桩结构的三维有限元分析模型,分析了参数变化对结构稳定性的影响^[1]。蔡正银等用有限元软件模拟了单锚板桩码头港池开挖过程中前墙两侧的土压力分布、结构的内力与变形、地基土的应力应变关系^[2]。Bauer研究了桩-土界面的粗糙度、桩的尺寸、桩的形状、桩周软土的位移速率和桩间距对桩侧向压力的影响^[3]。Qu等为揭示板桩墙加固边坡的抗震机理提供了可靠的理论依据^[4]。Jiao等详细分析了结构单元的内力在不同地震加速度值下的变化特征^[5]。付长静等分析探讨了卸荷式板桩墙高桩梁板码头结构的土压力计算方法^[6]。胡黎明等分析了板桩墙结构在设计波浪荷载作用下的水平位移和弯矩^[7]。GuhaRay等发现地基土的粘聚力和地下水位对板桩墙的稳定性的影响^[8]。

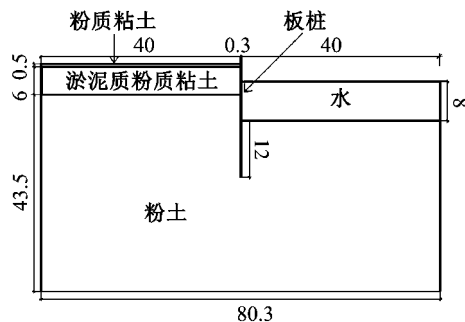
目前对于垂直护岸板桩在波浪荷载作用下的变形特征以及波浪要素对桩身变形影响的研究相对较少。因此,本文运用有限元软件 ABAQUS 对垂直

板桩护岸结构进行数值模拟研究,掌握板桩水平位移随深度的变化规律,分析了板桩的弹性模量、波浪的波高和波长对板桩水平位移的影响。

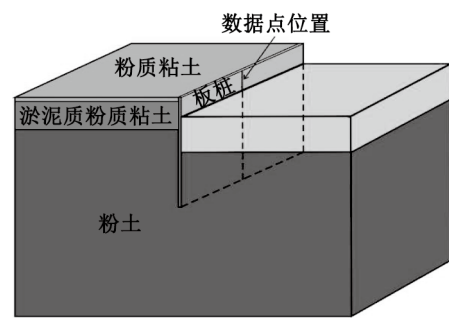
1 数值分析模型建立

1.1 模型建立

垂直护岸板桩桩体采用预制钢筋混凝土矩形板桩,长为 24 m,宽为 0.5 m,厚度为 0.3 m,自桩顶到桩尖全部采用凹凸榫槽咬合连接,并将桩尖制成楔形。为使建模方便,将板桩墙结构简化为一个整体,不考虑凹凸榫槽之间的连接和桩尖的楔形构造。模型平面图如图 1(a)所示,板桩墙前后土体长度各取 40 m,岸边土体高度取 50 m,水深为 8 m,板桩没入河底的深度为 12 m,露出水面部分为 4 m,土体共分为三层,粉质粘土层厚度为 0.5 m,淤泥质粉质粘土层厚度为 6 m,粉土层厚度为 43.5 m。板桩临水面正中央沿深度方向每隔 1 m 取一个观察点,共有 25 个观察点。模型立体图如图 1(b)所示。板桩桩体的模型尺寸在 X 方向上取 0.3 m, Y 方向上取 15 m,相当于 30 根桩连接而成的宽度, Z 方向上取 24 m,如图 2(a)所示。土体模型的尺寸在 X 方向上取 80.3 m,在 Y 方向上取 15 m,在 Z 方向上与桩齐



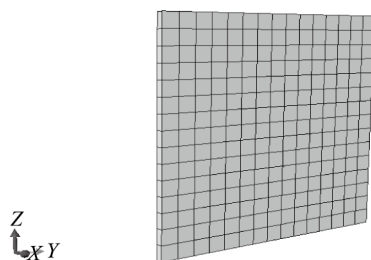
(a) 平面图



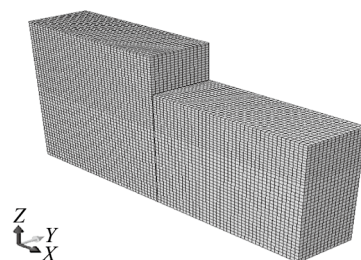
(b) 立体图

图 1 模型示意图 (单位: m)

Fig.1 Schematic diagram of the model



(a) 桩体计算模型



(b) 土体计算模型

图 2 桩体和土体单元网格模型

Fig.2 Pile and Soil Element Mesh

平部分为 50 m，水下部分为 38 m，如图 2(b) 所示。土体和桩体全部采用 C3D8R 缩减积分单元，整个模型一共有 57 120 个网格单元，63 776 个网格节点，其中桩体包含 360 个网格单元和 800 个网格节点。土体模型四周边界约束 X 和 Y 方向的水平位移，底部约束 X 、 Y 和 Z 三个方向的位移，桩体模型 Y 方向侧边约束 X 和 Y 方向的水平位移。桩土界面采用面对面的接触方式，接触面的法向模型选为硬接触，摩擦特性选为 Penalty，采用罚刚度算法，摩擦系数取 0.3。

1.2 基本假定

- (1) 土体为弹塑性材料，服从摩尔 - 库伦准则；
- (2) 桩体为均质各向同性的线弹性体；
- (3) 不考虑桩端进入持力层的影响；

1.3 本构模型及参数

土体在计算过程中假设为单一均质的弹塑性体，服从摩尔 - 库伦准则，因而采用摩尔 - 库伦模型。桩体为预制钢筋混凝土桩，采用线弹性模型。土体和桩体参数如表 1 所示。

表 1 土体和桩体材料参数
Tab.1 Parameters of Soil and Pile

类型	天然密度 ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/kPa	泊松比 μ	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
粉质粘土	1 910	8 970	0.30	20.1	27
淤泥质粉质粘土	1 760	3 600	0.30	16.4	17.1
粉土	1 930	30 500	0.30	10.2	30.2
板桩	2 500	/	0.2	/	/

表 2 数值模拟工况表
Tab.2 Numerical Simulation Conditions

影响因素	工况	板桩的弹性模量 /GPa	波高 H/m	波长 L/m	最大波压力强度 p/kPa
板桩的弹性模量	1	25	2.0	70	31.89
	2	30	2.0	70	31.89
	3	35	2.0	70	31.89
	4	40	2.0	70	31.89
波高	5	25	1.0	70	17.94
	6	25	1.5	70	25.10
	7	25	2.0	70	31.89
	8	25	2.5	70	38.80
波长	9	25	2.0	70	31.89
	10	25	2.0	90	32.20
	11	25	2.0	110	33.10
	12	25	2.0	130	33.90

2 数值模拟工况

影响板桩水平位移的因素有很多，本文仅对板桩的弹性模量、波浪的波高和波长进行研究。根据《板桩码头设计与施工规范》^[9](JTS167-3-2009)，不考虑板桩墙后的剩余水头。《海港水文规范》^[10](JTS145-2-2013) 中关于波峰作用下立波作用力的相关公式如下：

$$\frac{p}{\gamma d} = A_p + B_p (H/d)^q$$

式中 d 为建筑物前水深； γ 为水的重度； p 为墙面上各特征点波压力强度； H 为波高；系数 A_p 、 B_p 、 q 均由《海港水文规范》查表确定。计算出各特征点的波压力强度，设置静力分析步，通过面力的方式施加于板桩墙的临水侧。具体工况如表 2 所示。

3 数值模拟结果

3.1 板桩弹性模量的影响

对表 2 中的工况 1~4 进行研究，数值模拟结果如图 3 所示。从图 3 中可知（正方向为临水侧），板桩在桩顶处位移较小，随着桩的入土深度增加，桩

身位移先增大后减小,在深度 13 m 以下位移较小,在深度为 9 m 处位移量达到最大值。板桩的弹性模量对桩身水平位移的影响较小,在其它条件相同的情况下,随着板桩的弹性模量增大,桩身水平位移从桩顶到深度为 13 m 处逐渐减小,弹性模量对深度 13 m 以下的板桩水平位移影响较小。

3.2 波高的影响

对表 2 中的工况 5~8 进行研究,数值模拟结果如图 4 所示。从图 4 中可知(正方向为临水侧),当波高为 2.5 和 2.0 m 时,板桩在桩顶处位移较小,当波高为 1.5 和 1.0 m 时,板桩在桩顶处位移较大,随着桩的入土深度增加,桩身位移先增大后减小,在深度 13 m 以下位移较小。波高对深度 0 到 13 m 范围内板桩的水平位移影响较大,对深度 13 m 以下的板桩水平位移影响较小。在其它条件相同的情况下,随着波高的增大,桩身最大位移点处的深度逐渐增大,桩身水平位移从桩顶到深度为 13 m 处逐渐减小。

3.3 波长的影响

对表 2 中的工况 9~12 进行研究,数值模拟结果如图 5 所示。从图 5 中可知(正方向为临水侧),板桩在桩顶处位移较小,随着桩的入土深度增加,桩身位移先增大后减小,在深度 13 m 以下位移较小,在深度为 9 m 处位移量达到最大值。波长对深度 0 到 13 m 范围内板桩的水平位移影响较大,对深度 13 m 以下的板桩水平位移影响较小。在其它条件相同的情况下,随着波长的增大,桩身水平位移从桩顶到深度为 13 m 处逐渐减小。

由于在本次数值模拟工作中,根据现场资料和

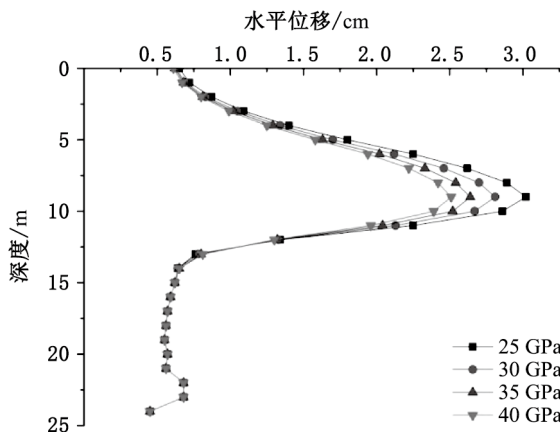


图 3 弹性模量对桩身水平位移的影响

Fig.3 Influence of elastic modulus on horizontal displacement of pile body

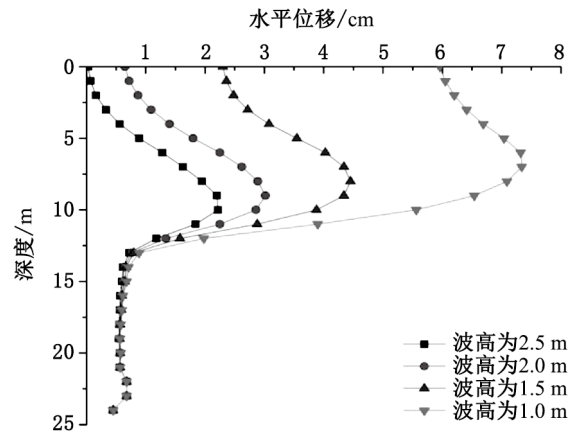


图 4 波高对桩身水平位移的影响

Fig.4 Influence of wave height on horizontal displacement of pile body

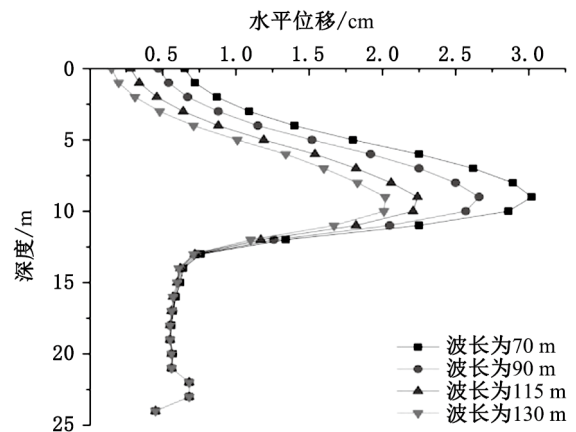


图 5 波长对桩身水平位移的影响

Fig.5 Influence of wavelength on horizontal displacement of pile body

文献资料设定桩和土的相关参数,存在一定的问题,如模拟结果在深度 13 m 以下存在较大位移,未来将进行深入研究。

4 结论

1) 板桩的弹性模量对桩身水平位移的影响较小,在其它条件相同的情况下,随着板桩的弹性模量增大,桩身水平位移从桩顶到深度为 13 m 处逐渐减小,弹性模量对深度 13 m 以下的板桩水平位移影响较小。

2) 波浪的波高对深度 0 m 到 13 m 范围内板桩的水平位移影响较大,对深度 13 m 以下的板桩水平位移影响较小。在其它条件相同的情况下,随着波高的增大,桩身最大位移点处的深度逐渐增大,桩身水平位移从桩顶到深度为 13 m 处逐渐减小。

3) 波浪的波长对深度 0 m 到 13 m 范围内板桩

的水平位移影响较大,对深度13 m以下的板桩水平位移影响较小。在其它条件相同的情况下,随着波长的增大,桩身水平位移从桩顶到深度为13 m处逐渐减小。

参考文献:

- [1] 王元战,焉振,王禹迟.格型钢板桩结构有限元数值分析[J].岩土力学,2013,34(4):1163-1170.
- [2] 蔡正银,侯伟.单锚板桩结构的工作机理研究[J].岩土工程学报,2015,37(1):29-34.
- [3] BAUER J, REUL O, KEMPFERT H G. Lateral pressure on piles due to horizontal soil movement[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2016, 16(4): 173-184.
- [4] QU H L, LUO H, LIU L, et al. Analysis of Dynamic Coupling Characteristics of the Slope Reinforced by Sheet Pile Wall[J]. Shock and Vibration, 2017(7): 1-10.
- [5] JIAO Z, TAN H, MEI T, et al. Numerical analysis on dynamic responses of the sheet-pile wharf with separated relieving platform under horizontal seismic loads [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 73: 270-276.
- [6] 付长静,李国英,米占宽,等.卸荷式板桩高桩梁板码头结构土压力简化计算[J].岩土力学,2015,36(8):2426-2432.
- [7] 胡黎明,赵敏,吴照群,等.近海取水工程板桩墙安全性离心模型试验研究[J].岩土力学,2011,32(6):1741-1747.
- [8] GUHARAY A, BAIDYA D K. Reliability-Based Analysis of Cantilever Sheet Pile Walls Backfilled with Different Soil Types Using the Finite-Element Approach[J]. International Journal of Geomechanics, 2015, 15(6): 06015001.
- [9] JTS167-3-2009,板桩码头设计与施工规范[S].
- [10] JTS145-2-2013,海港水文规范[S].

(责任编辑 王利君)

(上接第10页)

1) 在凯威特-肋环杂交型、凯威特-施威德勒杂交型、凯威特-联方杂交型、肋环-凯威特杂交型、施威德勒-凯威特杂交型、联方-凯威特杂交型6种类型结构中,同等工况下,凯威特-联方型网壳结构形式和受力性能最合理,在实际工程设计时,可优先选用。

2) 数据研究发现,长轴跨度 $S_l=55\sim 95$ 变化时,两类杂交椭圆抛物面网壳最大位移和最不利应力均满足许用值,可见在本文给定的各项参数下两类网壳均可达到大跨跨度。联方-凯威特型网壳结构随跨度增加结构受力性能下降,长轴跨度超过100 m时,结构最不利应力不满足许用值,因此工程中建议LAM-KIE跨度上限为90~100 m。

(3) 通过分析可知,第一类以凯威特型为顶部结构的杂交椭圆抛物面网壳矢跨比 f/S 取 $1/4\sim 1/3$,第二类以凯威特型为底部结构的网壳矢跨比 f/S 取 $1/3\sim 1/2$ 受力性能最合理。

参考文献:

- [1] 鹿晓阳,赵晓伟,陈世英.离散变量网壳结构优化设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 姜正荣,王仕统,石开荣,等.厚街体育馆大跨度椭圆抛物面弦支穹顶结构的非线性屈曲分析[J].土木工程学报,2013(9):21-28.
- [3] 罗斌,郭正兴,冯远,等.常州市体育馆椭圆抛物面弦支穹顶稳定性研究[J].建筑结构学报,2009,30(6):148-154.
- [4] 杜文凤,喻福东.沁阳市体育馆椭圆抛物面弦支穹顶稳定性研究[J].建筑结构,2013(22):39-42.
- [5] 鹿晓阳,付浩鑫,赵晓伟,等.杂交型椭圆网壳参数化设计及受力性能分析[J].山东建筑大学学报,2016,31(6):511-520.
- [6] 苏亚,鹿少博,鹿晓阳,等.杂交型马鞍网壳结构参数化设计及形状优化[J].山东建筑大学学报,2015(2):38-46.
- [7] 赵志佳.旋转抛物面网壳参数化设计及稳定性分析[D].济南:山东建筑大学,2016.
- [8] GB50009—2012,建筑结构荷载规范[S].
- [9] 陈志华,刘红波,周婷.空间钢结构APDL参数化计算与分析[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [10] JGJ7-2010,空间网格结构技术规程[S].

(责任编辑 王利君)