

基于有限元的高分子聚合物板桩结构 承载变形特性研究

谢 明¹, 周康健¹, 袁志颖²

(1. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000; 2. 江苏鸿基水源科技股份有限公司, 江苏 扬州 225000)

摘要:针对高分子聚合物(PVC)板桩这一新型挡土结构,利用ABAQUS有限元分析软件建立了PVC板桩-土三维耦合模型。根据标准对板桩强度、变形进行分析,结果表明PVC板桩在最不利工况下可以满足规范设计要求。通过对桩施加水平荷载,定性分析了方型板桩水平承载性能优于几字型板桩。同时获得板桩桩身弯矩随深度的分布情况和土体等效塑性应变区域分布情况,结果表明,PVC板桩呈现出柔性桩变形模式,外荷载主要通过板桩自身屈服和浅层土体承担。方型板桩结构设计有利于调动更大范围土体来抵抗外荷载,研究成果可为后续河道护岸中PVC板桩设计提供参考。

关键词:高分子聚合物板桩; 变形; 柔性桩; 有限元

中图分类号:TV39

文献标识码:A

文章编号:1007-7839(2024)11-0039-0004

Research on load-bearing and deformation characteristics of high polymer sheet pile structures based on finite element

XIE Ming¹, ZHOU Kangjian¹, YUAN Zhiying²

(1. Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China;

2. Jiangsu Hongji Water Source Technology Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract: For the new retaining structure of high polymer (PVC) sheet piles, a three-dimensional PVC sheet pile-soil coupling model is established by using ABAQUS finite element analysis software. According to the standards, the strength and deformation of PVC sheet piles are analyzed, and the results show that PVC sheet piles can meet the design requirements of the specifications under the most unfavorable working conditions. By applying horizontal loads to the piles, it is qualitatively analyzed that the horizontal bearing performance of square sheet piles is superior to that of zigzag sheet piles. At the same time, the distribution of bending moment of the sheet pile body with depth and the distribution of equivalent plastic strain zone of the soil are obtained. The results show that the PVC sheet pile exhibits a flexible pile deformation mode, and the external load is mainly borne by the yield of the sheet pile itself and the shallow soil. The design of the square sheet pile structure is conducive to mobilizing a larger range of soil to resist external loads. The research results can provide a reference for the subsequent design of PVC sheet piles in river bank protection.

Key words: high polymer sheet pile; deformation; flexible pile; finite element

收稿日期: 2024-07-21

基金项目: 江苏鸿基水源科技股份有限公司自研课题(HJKJYF-2024-02)

作者简介: 谢明(1967—),男,工程师,本科,主要从事水工建筑物监理。E-mail:1103797525@qq.com

在城市河道的护岸工程中,为节约占用的土地资源,一般采用挡土墙进行护岸,保障城市的防洪安全。目前作为护岸的挡墙结构有现浇混凝土挡墙、木板桩、钢筋混凝土板桩和钢板桩等。由于挡墙结构往往存在工程工期长、造价高,补强修复困难等缺陷,因此现代河道护岸多采用适应性强、施工简便,工效高的板桩式挡土结构^[1]。然而传统板桩如钢筋混凝土板桩、木桩等具有维护成本高、耐腐蚀性差等缺陷。随着高分子材料的发展,高分子聚合物板桩结构凭借造价低、维护费用低、施工速度快等优点逐渐取代传统板桩,广泛应用于河道护岸工程中。

高分子聚合物板桩是以硬质聚氯乙烯PVC为主材料,配以多种功能型化学助剂经原位聚合、挤出成型的产品^[2]。对于这一新型材料下板桩的承载变形特性,已有多位学者采用有限元分析展开了一定的研究。张竞等^[3]通过有限元软件建立高分子仿木桩桩土模型,分析了结构在不同挡土高度下的应力、变形等规律,结果表明,新型高分子板桩结构在不同挡土高度下均可满足稳定性设计要求。王雪红等^[4]通过Autobank和理正深基坑软件对高分子板桩护岸的抗滑、渗流和桩顶位移进行计算,结果表明高分子板桩在各工况下的数据均满足规范要求。张冲^[5]研究了PVC板桩在基坑支护时的长期变形特性,分析了不同土体参数对板桩结构支护能力的影响。应当指出的是,以往的研究多集中于验证高分子板桩在河道护岸工程中的适用性,缺少对这一新型板桩结构承载变形特性的研究。本文依托扬州市某河道护岸工程,在ABAQUS中建立了PVC板桩结构与河床土的三维耦合模型,对比分析几字型板桩结构与方型板桩承载变形特性的差异,揭示了方型板桩结构水平承载变形性能的提升机理,为后续PVC板桩结构设计提供参考。

1 项目概况

项目位于扬州市经济技术开发区施桥镇,工程内容为新开1条长约0.9 km河道,河道设计常水位3.3~3.5 m,设计高水位3.7~3.9 m。设计河底▽0.5 m,底宽5.0 m,按1:3放坡至▽2.8 m,▽2.8 m处设置0.5 m宽平台,平台后采用高分子聚合物仿木桩护岸,护岸顶▽3.6 m,桩长3.5 m,具体河道断面见图1。地质情况根据地质钻探报告采用计算断面附近最不利孔位的地质参数,各土层材料参数详见表1。拟选用的高分子聚合物方型板桩长度720 mm,

宽度220 mm,厚度6 mm,截面面积121.68 cm²,截面对 x 、 y 轴的抗弯系数分别为 $W_x=707.78\text{ cm}^3$ 、 $W_y=1\,784.07\text{ cm}^3$ 。应当指出的是,本研究中提供了一种几字型板桩用于对比分析,具体尺寸为长650 mm,宽250 mm,厚度6 mm,截面面积134.62 mm²,截面对 x 、 y 轴的抗弯系数分别为 $W_x=1\,109.22\text{ cm}^3$ 、 $W_y=1\,437.44\text{ cm}^3$ 。板桩性能参数由试验测得,具体见表2。

2 实际工况下PVC板桩结构有限元分析

为了研究高分子聚合物板桩的挡土性能,利用有限元分析软件ABAQUS模拟方型板桩和几字型板桩与扬州某河道护岸工程土体的三维耦合模型,分析最不利工况(设计高水位)下两种型式板桩的变形情况。

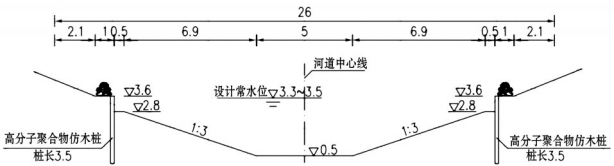


图1 河道断面(单位:m)

表1 工程地质参数

层号	土层名称	土层厚度/m	干重度/(kN/m ³)	固结快剪	
				黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
1	人工堆土	1.2	11.68	9.6	9.0
2	淤泥质重粉质壤土	2.6	12.69	8.3	8.0
3	轻粉质砂壤土	1.4	14.51	16.7	16.4
4	重粉质砂壤土	2.2	15.30	19.7	17.7

表2 板桩材料性能参数

试验参数	弹性模量/MPa	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
试验结果	2.81×10 ³	30.8	33.6

2.1 有限元模型

为减小有限元模型边界对计算分析的影响^[6],土体模型尺寸设置为2.5 m(长)×2.5 m(宽)×3 m(高)的立方体形。土体采用Mohr-Coulomb本构模型,其屈服准则为剪切破坏准则,由不排水抗剪强度控制,土体杨氏模量 $E=500S_u$ ^[7],土体和板桩均采用六面体八节点线性减缩积分单元(C3D8R)划分网格。数值模型中的土体和桩基础参数取值均取自本工

程中的实际数值。板桩与土体之间的接触面采用“surface-to-surface”接触,接触属性采用“Master-slave”算法。其中,材料刚度较大的桩表面定义为主控面,刚度较小的土体表面定义为从面。切向行为设置“Penalty”接触,法向行为设置“Hard”接触并允许接触后分离。实际工况下的主动土压力以“pressure”的方式施加于板桩表面,荷载方向为Y轴正向。土体底部采用完全固定约束,土体侧面仅约束法向位移。具体模型见图2。

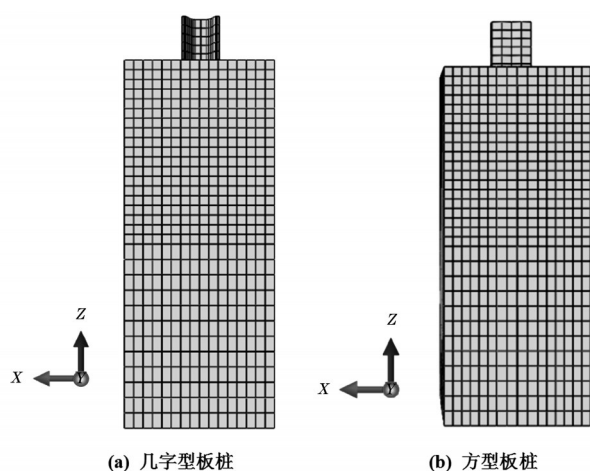


图2 有限元模型

2.2 最不利工况下荷载

由于可变荷载的随机性比较大,因此本文在计算时只考虑永久荷载的作用。因此板桩在挡土工况下主要受侧向土压力、板桩结构自重、板桩下曳力作用^[8]。由图1可知,在最不利工况(最大设计水位)时桩挡土侧土体全部位于水位以下,侧向土压力计算公式为

$$F_{ep} = k_a r_s z \quad (1)$$

式中: F_{ep} 为侧向主动土压力标准值; k_a 为主动土压力系数,本文取0.33; r_s 为土体有效重度; z 为地面至计算截面处深度。

下曳力计算公式为

$$T_A = \mu (F_{ep1} + F_{ep2}) / 2 \quad (2)$$

式中: T_A 为板桩单位面积上平均下曳力; μ 为板桩与土体间的摩擦系数,本文取0.25; F_{ep1} 为板桩挡土段顶部侧压力; F_{ep2} 为板桩挡土段底部侧压力。

2.3 最不利工况下有限元结果

本研究参考《建筑基坑支护技术规程》要求^[9],判定PVC板桩失效标准为桩顶部位移达到0.7%的板桩支护深度或达到板桩材料许用应力强度。以

本次施工过程中板桩支护深度0.8 m为例,材料失效位移为5.6 mm,失效强度为30 MPa。由图3~4可知,两种型式的PVC板桩在最不利工况下的变形和强度均可满足规范要求。值得注意的是,两种型式板桩的变形和应力主要集中于上半部分,这表明PVC板桩呈现出柔性桩的变形模式。

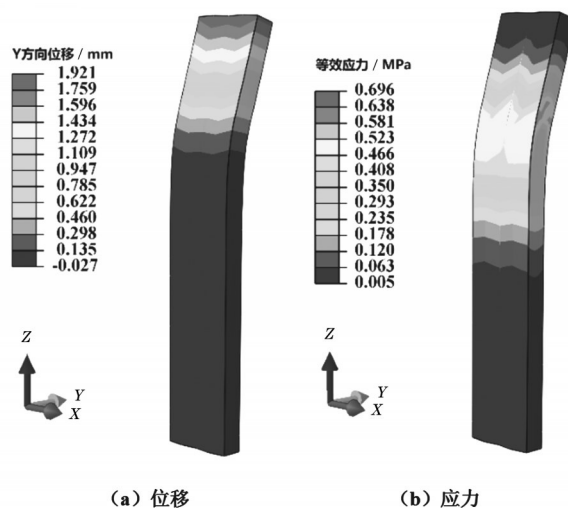


图3 方型板桩变形云图

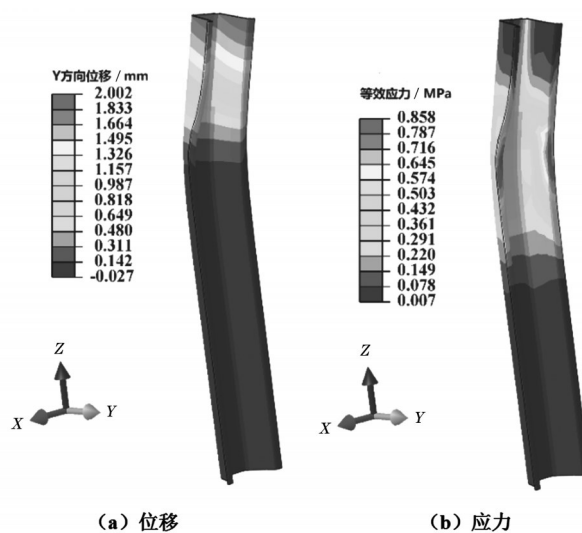


图4 几字型板桩变形云图

3 板桩水平承载变形特性

本节利用上述PVC板桩有限元模型,进一步研究水平位移荷载作用下板桩的承载与变形特性。图5为板桩顶水平力与水平位移变化曲线。由图5可知,随着荷载的增加,桩身位移显著增加,但桩-土体系的塑性状态并未明显发展。在相同荷载作用下,方型板桩的位移小于几字型板桩。图6为几字型板桩与方型板桩的桩身弯矩对比图。由图6可

知,两种型式板桩的桩身弯矩随深度的变化形式相同:沿深度先增大至峰值后减小至零,桩身弯矩峰值位置较浅。在相同的水平位移荷载下,方型板桩泥面处的桩身弯矩值更小,这也符合图5中的荷载-位移曲线规律。此外,桩身弯矩在埋深1.5 m处已减小至零,这表明板桩变形主要集中于上半部分,两种型式的PVC板桩均为柔性桩。随着水平荷载的增大,桩身会在泥面以下某一处屈服,且桩周土

体屈服后破坏,此时桩-土体系同时破坏。

两种板桩基础在位移荷载(加载方向为Y轴正向)作用下的等效塑性应变云图分别如图7-8所示。由图7-8可以看出,在位移荷载作用下,两种型式板桩的塑性应变区域主要集中于桩前土体,但方型板桩的塑性应变区域更大,具体表现为板桩两侧的土体也发生了塑性应变。这表明方型板桩可以调动更大范围的浅层土来抵抗外荷载。

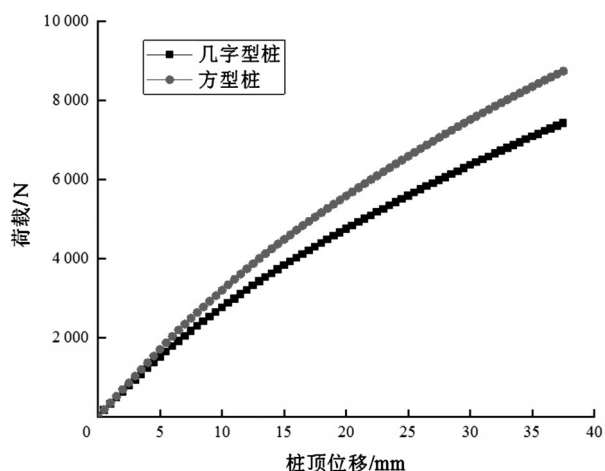


图5 荷载与位移变化曲线

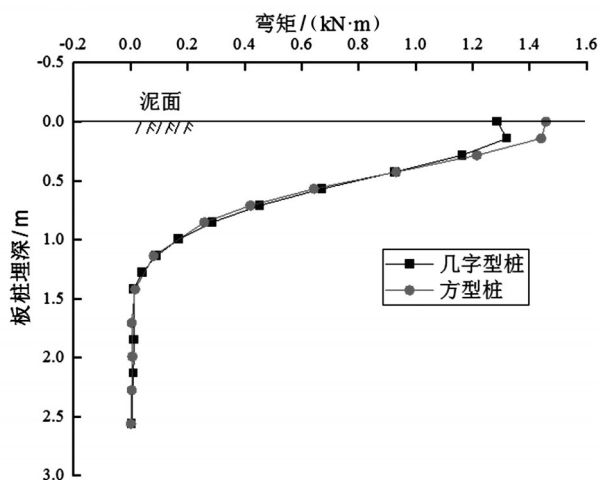


图6 板桩桩身弯矩随深度变化曲线

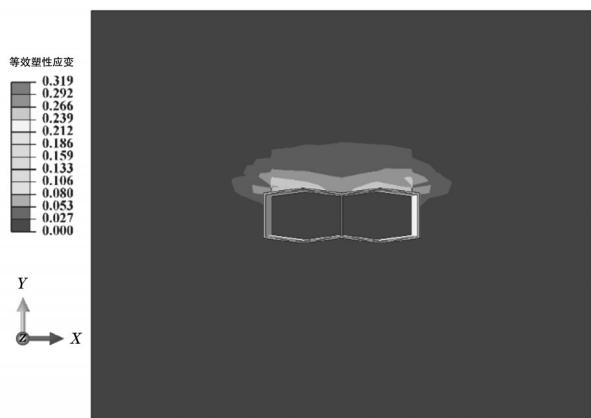


图7 方型板桩等效塑性应变云图

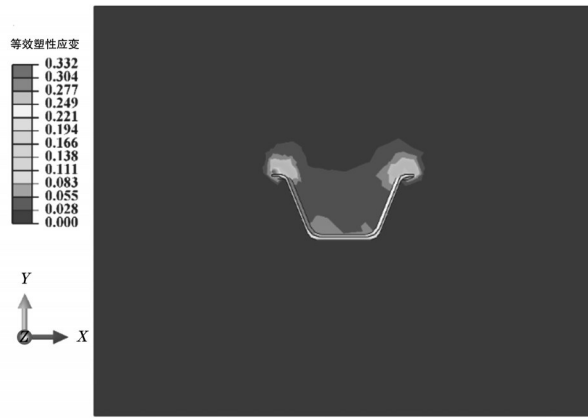


图8 几字型板桩等效塑性应变云图

4 结 论

本文依托扬州市某河道护岸工程,建立了新型高分子聚合物板桩基础与河床土的三维耦合有限元模型,研究PVC板桩的水平承载变形特性,获得如下结论:

(1)PVC板桩在最不利工况下的变形和应力均小于规范要求,满足稳定性设计要求

(2)方型PVC板桩的截面设计更加合理,其可以调动更大范围土体来抵抗外荷载。在相同外荷载作用下,方型PVC板桩的位移更小。

(3)由板桩的桩身弯矩变化曲线可以判断出PVC材料制成的桩主要为柔性桩,泥面以下桩体会在外荷载作用下发生较大的塑性变形,设计过程中可以考虑适当减小板桩埋深,增大板桩截面抗弯刚度。

(下转第47页)

抗压强度的增加而增加,二者整体呈线性关系,得出强度关系公式为: $c=0.1346f_{cu}-15.663$ 。

参考文献:

- [1] YI Y, LI C, LIU S. Alkali-activated ground-granulated blast furnace slag for stabilization of marine soft clay[J]. Materials in Civil Engineering, 2015, 27(4).
- [2] 刘松玉,席培胜,储海岩,等.双向水泥土搅拌桩加固软土地基试验研究[J].岩土力学, 2007(3):560-564.
- [3] 郭万鹏,冯祯辉,曹凤旭,等.水利工程软土地基勘察及处理技术[J].工程与建设, 2022, 36(2):375-376, 433.
- [4] 倪春海,李凯.水泥土搅拌桩桩身强度的分析和探讨[J].建筑安全, 2022, 37(5):12-14.
- [5] 姚达,王希晨,赵虎,等.三维水泥土搅拌桩成桩工艺现场试验[J].江苏水利, 2023(7):63-67.
- [6] 曾玲玲,王月娇,卞夏,等.“土力学”科教融合课程建设探讨[J].教育教学论坛, 2023(52):92-96.
- [7] 郭斌,彭帅,商兆涛,等.三轴搅拌桩对盾构隧道始发端变形影响三维数值模拟研究[J].安徽建筑, 2022, 29(7):125-127.

(上接第42页)

参考文献:

- [1] 徐西群.基于有限元的高分子聚合物板桩结构设计与研究[D].扬州:扬州大学, 2019.
- [2] 严刘伟,王新华,岳明昊,等.生态护岸的类型及应用[J].科学技术创新, 2020(6):132-133.
- [3] 张竞,叶素飞.新型高分子仿木桩结构性能分析[J].农业装备技术, 2022, 48(3):38-40.
- [4] 王雪红,袁海霞.高分子板桩在城市河道护岸工程中的应用[J].江苏水利, 2021(8):10-14.
- [5] 张冲. PVC板桩的制备及其耐老化性能研究[D].扬州:扬州大学, 2018.
- [6] 徐光明,章为民.离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J].岩土工程学报, 1996, 18(3):80-86.
- [7] 章刘洋.地基对大直径桩的水平静力和循环抗力数值分析研究[D].杭州:浙江大学, 2018.
- [8] 韦源源,杨过,龚俊杰,等.新型高分子聚合物板桩结构分析[J].机械工程与自动化, 2020(6):66-67.
- [9] 中国建筑科学研究院.建筑基坑支护技术规程:JGJ 120—2012[S].北京:中国建筑工业出版社, 2012.