

桩板式挡土墙桩土间土拱效应分析

包腾飞¹,周喜武²,戴俊平³,王文全²,陈娟娟⁴,朱捷⁵

(1. 河海大学 水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司,江苏 南京 210029;
3. 泰兴市水利工程服务中心,江苏 泰兴 225330; 4. 泰兴市堤闸养护服务中心,江苏 泰兴 225330;
5. 泰兴市防汛抗旱指挥部办公室,江苏 泰兴 225330)

摘要:桩板式挡土墙因结构简单可靠、施工占地小、建设费用低等特点,已被多个河道整治工程采用。桩板式挡土墙常布置在软黏土地基中,桩土间力学特性较为复杂。为厘清桩土间土拱效应形成的影响因素,采用数值模拟的方法,研究桩间距、土体抗剪参数、桩土间的摩擦系数对土拱效应的影响。结果表明,桩间距为2~5倍的桩宽时土拱效应最强;土拱作用随土体黏聚力减小、内摩擦角增大而增强;桩土间摩擦系数越大,桩间土体受到桩体的约束越强,反向应力拱越强。研究成果可为桩板式挡土墙设计提供参考。

关键词:桩板式挡土墙;土拱效应;河道整治;有限元

中图分类号:TV698.12

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2025)03-0012-0005

Analysis of soil arch effect between piles and soils in pile-plate retaining wall

BAO Tengfei¹, ZHOU Xiwu², DAI Junping³, WANG Wenquan²,
CHEN Juanjuan⁴, ZHU Jie⁵

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Water Conservancy Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Nanjing 210029, China;
3. Taixing Water Conservancy Engineering Service Center, Taixing 225330, China;
4. Taixing Levee and Lock Maintenance Service Center, Taixing 225330, China;
5. Taixing Flood Control and Drought Relief Command Office, Taixing 225330, China)

Abstract: Pile-plate retaining walls have been adopted in multiple river regulation projects due to their simple and reliable structure, small construction footprint, and low construction costs. Pile-plate retaining walls are often arranged in soft clay foundations, and the mechanical properties between piles and soil are relatively complex. This paper aims to clarify the influencing factors of soil arch effect between piles and soil, and uses numerical simulation methods to study the effects of pile spacing, soil shear parameters, and friction coefficient between piles and soil on soil arch effect. The results indicate that the soil arch effect is strongest when the pile spacing is 2-5 times the pile width; The soil arch effect increases with the decrease of soil cohesion and the increase of internal friction angle; The larger the friction coefficient between piles and soil, the stronger the constraint of the pile on the soil between piles, and the stronger the reverse stress arch. The research results can provide reference for the design of pile-plate retaining walls.

Key words: pile-plate retaining wall; soil arch effect; river regulation; finite element

收稿日期: 2024-12-12

作者简介: 包腾飞(1974-),男,教授,博士,主要从事水工结构数值分析研究。E-mail: baotf@hhu.edu.cn

桩板式挡土墙由钢筋混凝土预制桩和板组成,其特点是结构简单可靠、施工安装便捷、经济性好。桩板式挡土墙施工开挖范围小,对于沿河建筑物多、施工场地狭小的工程尤为适用,能够较好地解决用地受限及征地拆迁困难等问题,而且对于水利工程,河道无需断流施工。桩板式挡土墙广泛应用于道路工程、市政工程^[1-5],近年来也逐渐应用于水利工程。崔立柱等^[6]研究了江苏平原地区城区河道整治工程中桩板式挡土墙的设计与施工方法。严正春等^[7]介绍了桩板式挡土墙在连云港疏港航道工程中的应用情况,分析了桩板式挡土墙的工程效益和社会效益;陈桂兰^[8]结合崇明岛某码头护岸桩的具体设计,研究了桩板式结构的计算理论和设计方法。总体而言,桩板式挡土墙在河道整治工程中应用不多,相关计算原理和方法尚不够成熟。与道路工程、市政工程不同的是,河道整治工程中土质更为复杂,常常将桩板式挡土墙布置在软黏土地基中,使得桩的截面尺寸、桩长、桩间距之间的组合关系及受力特性更为复杂。因此,有必要对桩板式挡土墙应用技术进行深入研究。

桩板式挡土墙主要依靠桩深入土体一定深度维持稳定,其支护作用体现在桩体与滑体土体之间的相互作用,滑体土体在桩体的阻挡和摩擦作用下,桩后和桩间的土体位移不一致,土体应力方向发生偏转,产生了以相邻桩体为拱脚的土应力拱,结果是桩间土体应力减小,部分土体压力转移到桩体上。桩体和土拱共同作用可以分担部分滑动力。因此,在桩板式挡土墙防护工程中,应合理布置桩间距,充分利用土拱效应,减小结构尺寸,降低工程造价。土拱效应对挡土墙结构尺寸影响较大,黏土地基中桩后产生土拱效应目前尚无人研究,因此有必要研究桩板式挡土墙中桩结构受力特性,分析作用在桩间的荷载分布和特征,为桩板式挡土墙结构优化设计奠定基础。

1 计算模型及参数

本文采用国际知名有限元软件 Abaqus 进行结构分析,混凝土和土体分别采用线弹性和弹塑性本构模型,土体的屈服准则采用常用的 Mohr-Coulomb 准则,计算中考虑桩-土接触和摩擦。本文为了简化分析,建立包含桩体和土体的平面有限元模型。建立以各桩截面的中心连线为 x 轴、桩后为 y 轴正方向的坐标系。模型中桩的截面尺寸为 $0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ (宽 \times 高),模型的范围为: x 向取等间距布置四根桩

的宽度(考虑对称性); y 方向上取 15 倍桩宽,其中桩前、桩后分别取 5 倍、10 倍的桩宽。模型共剖分了 19 795 个单元、20 246 个节点,如图 1 所示。桩土间接触面摩擦系数取 0.4。材料物理力学参数取值见表 1。

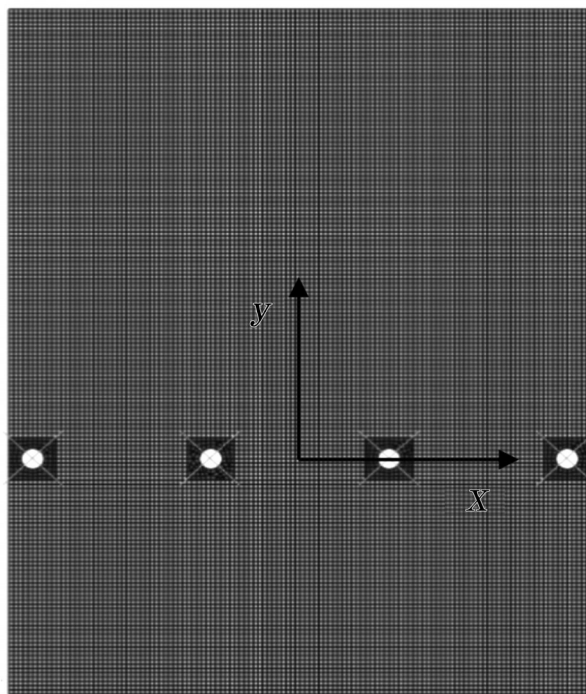


图1 模型网格

表1 材料参数

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
土体	4.32	0.350	7.1	13.9
混凝土	20000	0.167		

2 土拱效应影响因素分析

2.1 桩间距对土拱效应的影响

为分析桩间距对土拱作用的影响,分别建立了桩间距为 1、1.5、2、2.5、3、3.5、4、4.5、5 m 共 9 个有限元模型。在桩后土体上施加 100 kN/m 的均布荷载以模拟滑动力作用。图 2 为各间距情况下 y 向的应力云图。 y 向应力分布明显呈拱的形状,在桩间中心线上的应力从桩后向桩前呈减小的规律,在桩体的阻挡和桩周摩擦力的作用下,形成桩前凸向下、桩后凸向上的两个相反土拱,它们均以相邻桩体为拱脚。考察桩后应力拱可以发现,从拱冠到拱脚,土体应力逐渐增大,说明由于土拱的作用,部分滑

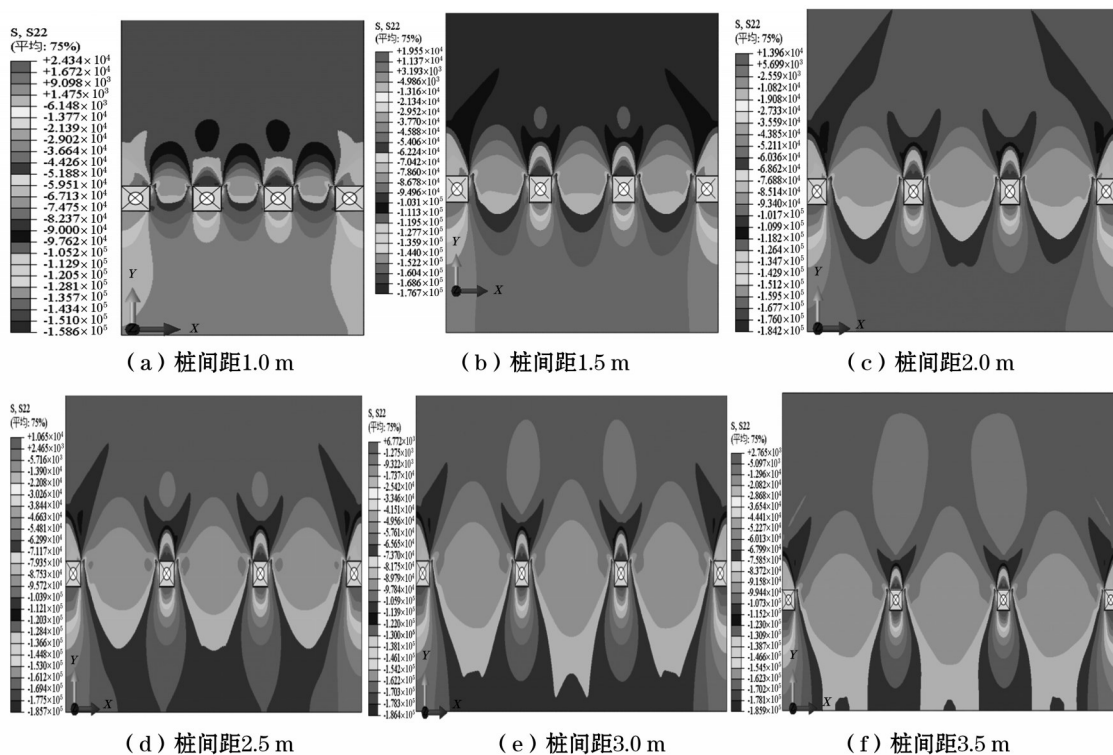


图2 y向应力云图(Pa)

动力由土体转移到桩体上。当桩间距增大时,在桩间中心线上的应力随之减小;当桩间距为2.5~5 m时,中心线上土体应力与桩后土体应力接近,土拱效应不明显。

为了消除边界条件的影响,取中间两根桩间的土体进行研究,图3、图4分别给出了各种间距情况下两桩中轴线上x向和y向的应力曲线。

由图3可知,随着y坐标的增大,x向应力先增大后减小,各条应力曲线出现了明显的“波峰”,其中桩间距为1.0~2.0 m应力曲线最扁、峰值最大,y坐

标为0~1.0 m范围内应力曲线最陡,表明此范围内土拱作用最明显。由图4可知,中轴线上的y向应力离桩的距离越大应力越大,最后在桩后2.0 m以外的地方,所有曲线几乎水平,达到滑动力100 kPa,表明在此范围之外拱效应较小。土拱影响范围内,桩间距越小,y向应力变化幅度越大,如间距为1.0 m时,y向应力在桩后0.25~0.75 m范围内快速从65 kPa变化到100 kPa,而桩间距大于2.5 m时,y向应力的变化幅度相对较小。由图3和图4可得到相同的结论,即当桩间距1.0~2.0 m时土拱作用最明显,滑动

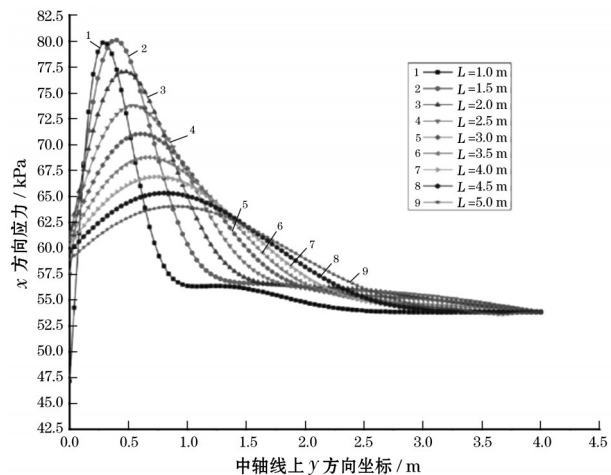


图3 中轴线上x向应力分布曲线

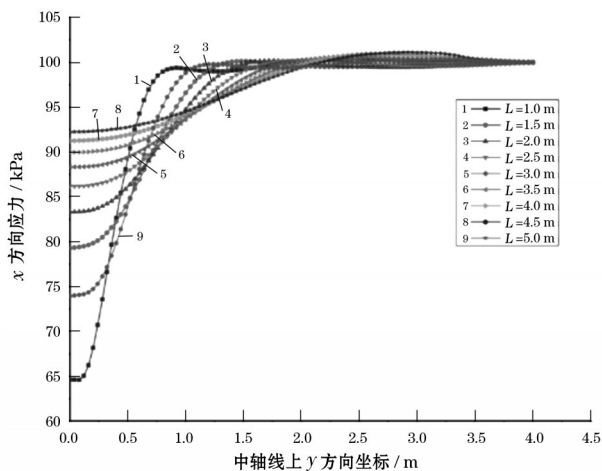


图4 中轴线上y向应力分布曲线

力被有效转移到桩体上,也就是当桩间距为2~5倍的桩宽时, x 、 y 向应力梯度大、土拱作用强,当桩间距大于5倍的桩宽时,土拱作用弱。

2.2 土体抗剪强度指标对土拱效应的影响

抗剪强度指标对土体稳定性有重要影响,土拱作用的发挥与其有直接的关系。由上节分析可知,当桩间距为1~2 m时土拱作用效应最强,因此取桩间距为1 m的有限元模型,桩后土体滑动力仍取100 kN/m,研究黏聚力 c 和内摩擦角 φ 变化对土拱作用的影响。

2.2.1 黏聚力的影响

其他参数不变,分别取黏聚力为15 kPa、20 kPa、25 kPa、30 kPa,计算土体的应力和变形。图5和图6分别为中轴线上 x 、 y 向应力分布。可以看出,在桩后1 m范围内,所有黏聚力下的 x 向应力快速增加,均在桩后0.3 m处达到峰值; y 向应力从桩平面到桩后1 m迅速上升到100 kPa左右,表明在桩后1 m范

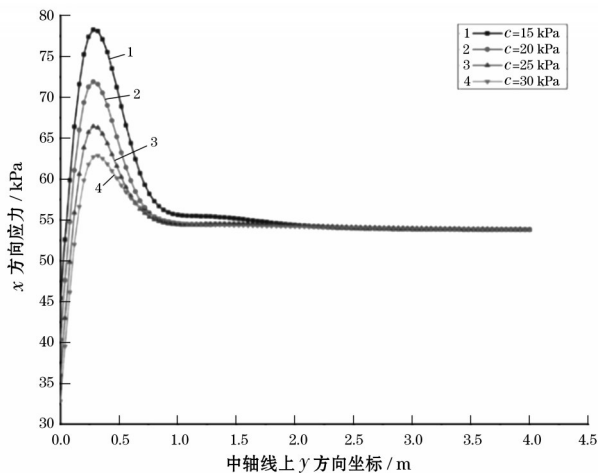


图5 中轴线上 x 向应力分布曲线

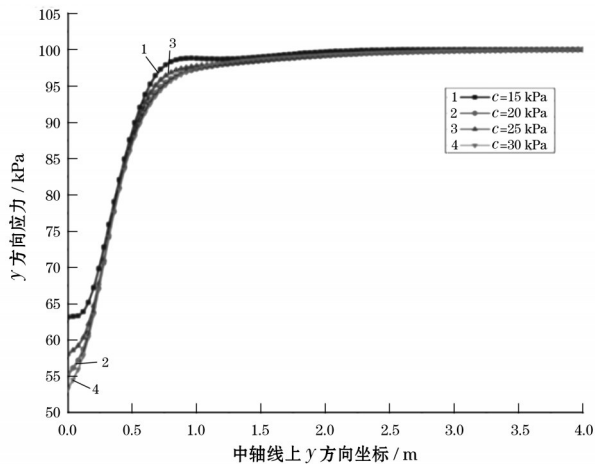


图6 中轴线上 y 向应力分布曲线

围内土拱效应最强。从图5还可以看出,当黏聚力为15 kPa时, x 向应力变化幅度最大,表明黏聚力越小越有利于土拱作用的发挥,而黏聚力越大,桩后、桩间土体相互约束越强,它们之间发生的相对位移越小,土拱作用越低。

2.2.2 内摩擦角的影响

为分析内摩擦角对土拱作用的影响,取土体内摩擦角分别为 5° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° ,计算土体的应力。图7为中间两根桩后0.3 m处断面上的 y 向应力。

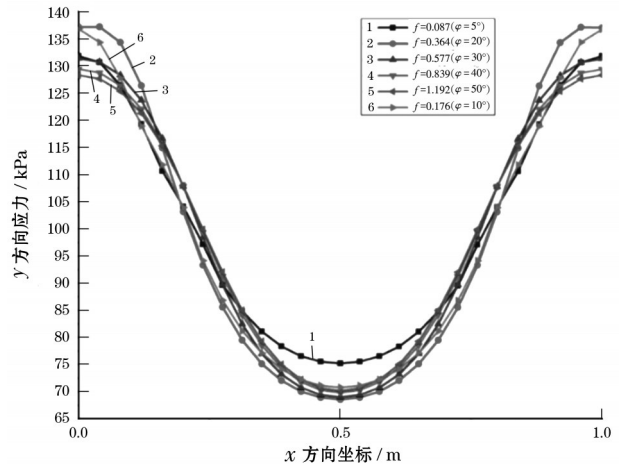


图7 $y=0.3$ m处横截面上 y 向应力分布曲线

由图7可以看出,所有内摩擦角下的应力都呈“U”型对称分布,对称中心为桩间中心线。对称中心处应力最小,为70~80 kPa,小于滑动力100 kPa;桩后应力最大,为128~137 kPa,大于滑动力100 kPa。说明滑动力由桩间向两侧桩体转移,存在土拱作用。同时可以看出,土体内摩擦角越大,桩后的应力越大,表明内摩擦角越大越有利于发挥土拱作用。

2.3 桩土间摩擦系数对土拱效应的影响

采用桩间距为1 m的模型,取桩土间摩擦系数分别为0.4、0.6和0.8,仍然施加100 kN/m的均布荷载,其余参数见表1,计算土体的应力,以考察桩土间的接触特性对土拱的影响。图8给出了 y 向应力的分布。由图8可知,随着摩擦系数的增加,桩后应力分布基本不变,而桩前的应力随摩擦系数的增大而减小,反向应力拱增强。计算结果表明桩土间摩擦系数越大,桩间土体受到桩体的约束越大,土体越难发生绕流,桩上会承担更多的土压力。

3 结 论

本文通过建立二维有限元模型分析了桩间距、

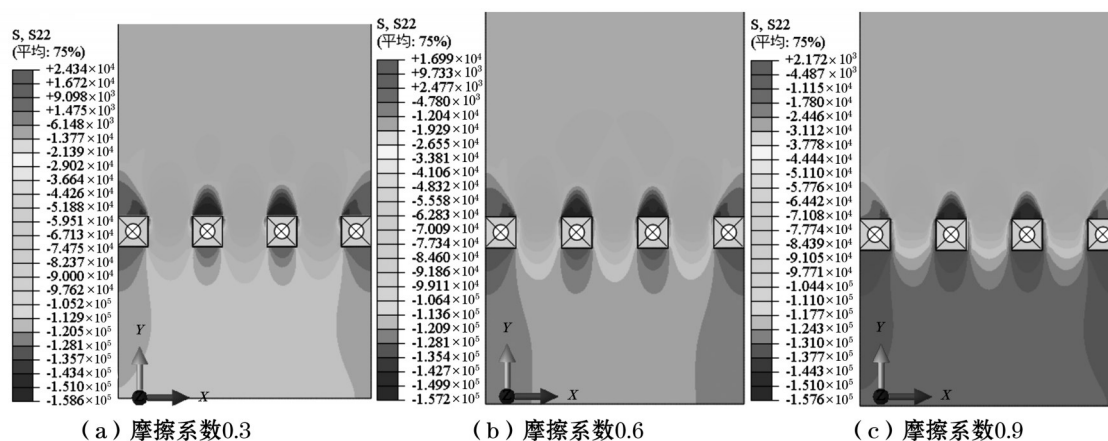


图8 不同摩擦系数下土体y方向应力分布(Pa)

土体抗剪强度指标及桩土间摩擦系数对黏土地基中土拱作用的影响,得到如下结论:

(1)在桩体的阻挡和桩周摩擦力的作用下,桩后形成以相邻桩体为拱脚的土应力拱,桩间距越大土拱作用越小,土拱作用在桩间距为2~5倍的桩宽时最强。

(2)黏聚力越小越有利于土拱作用的发挥,黏聚力越大,桩后、桩间土体相互约束越强,相对位移越小,土拱作用越低。

(3)桩土间摩擦系数越大,桩间土体受到桩体的约束越强,土体越难发生绕流,反向应力拱越强。

参考文献:

[1] 王伟力,丁建明,熊燕飞. 桩板式挡土墙施工方案设计

及技术分析[J]. 西部交通科技,2008(3):16-18.

[2] 李晓多. 桩板式深路堑挡土墙结构的安全性数值分析[J]. 科技信息,2010(18):670-671.

[3] 张志峰. “预应力锚索+桩板式挡土墙”支护结构应用研究[J]. 城市道桥与防洪,2011(9):29-31,319.

[4] 黄新雨. 抗滑桩板式挡墙结合柔性支护在膨胀土中的应用与思考[J]. 西部交通科技,2018(8):39-43.

[5] 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.

[6] 崔立柱,汪海涛. 桩板式挡墙在水利工程河道治理中的应用[J]. 治淮,2022(1):29-31.

[7] 严正春,郭强. 桩板式挡墙在连云港港疏港航道工程中的运用[J]. 现代交通技术,2011,8(增刊1):86-89.

[8] 陈桂兰. 桩板式结构在河道护岸工程中的应用[J]. 吉林水利,2007(12):28-29.