

插板桩与密打板桩护岸 位移稳定性研究与分析

宋黎明¹, 姜子岳², 常飞³

(1. 苏州禹通新材料科技有限公司, 江苏 苏州 215000;

2. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215000; 3. 苏州市水利工程有限公司, 江苏 苏州 215031)

摘要:为探究插板桩护岸与密打板桩护岸的位移稳定性差异,明确不同挡土高度、土质条件下两种护岸结构的适用场景,首先对比分析密打板桩与插板桩的受力机理,阐述二者在荷载传递、受力分布方面的核心区别;随后系统介绍两种板桩护岸的位移计算理论,明确计算模型及关键参数;通过土质分析、内力计算与位移对比,结合内力分析图和位移表格,探究两种结构的位移变化规律。研究表明:不同挡土高度下,密打板桩与插板桩的位移差异明显;在一般土质条件下,挡土高度2 m以内时,插板桩位移较密打板桩大10%~15%;挡土高度3 m以上时,插板桩位移较密打板桩大30%。研究成果可为护岸工程结构选型及位移控制设计提供理论依据与工程参考。

关键词:插板桩护岸; 密打板桩护岸; 受力原理; 位移分析; 工程应用

中图分类号:TV861 文献标识码:A 文章编号:1007-7839(2026)06-0016-0005

Research and analysis on displacement stability of sheet pile and driven close-fit sheet pile revetments

SONG Liming¹, JIANG Ziyue², CHANG Fei³

(1. Suzhou Yutong New Materials Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China;

2. Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215000, China;

3. Suzhou Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Suzhou 215031, China)

Abstract: To investigate the differences in displacement stability between sheet pile revetments and driven close-fit sheet pile revetments, and to clarify the applicable scenarios of these two revetment structures under varying earth-retaining heights and soil conditions, the study first compares and analyzes the force mechanisms of driven close-fit sheet piles and sheet piles, highlighting their core differences in load transfer and stress distribution. This paper then systematically introduces the displacement calculation theories for both types of sheet pile revetments, specifying the calculation models and key parameters. Through soil analysis, internal force calculations, and displacement comparisons, combined with internal force analysis diagrams and displacement tables, the study explores the displacement variation patterns of the two structural forms. The findings indicate that under different earth-retaining heights, the displacement differences between driven close-fit sheet piles and sheet piles are

收稿日期: 2026-03-12

作者简介: 宋黎明(1991—),男,工程师,硕士,主要从事水利工程设计、岩土工程勘察设计等工作。E-mail:1393492547@qq.com

significant. Under general soil conditions, when the earth-retaining height is within 2 m, the displacement of sheet piles is 10%–15% greater than that of driven close-fit sheet piles; when the height exceeds 3 m, the displacement of sheet piles is 30% greater than that of driven close-fit sheet piles. These results provide theoretical foundations and engineering references for the structural selection and displacement control design of revetment projects.

Key words: sheet pile revetment; driven close-fit sheet pile revetment; force mechanism; displacement analysis; engineering application

在河道整治、基坑支护、海岸防护等工程中,板桩护岸因结构紧凑、施工便捷、挡土挡水效果良好,被广泛应用于各类岩土工程场景^[1]。密打板桩护岸与插板桩护岸作为两种常见的板桩支护形式,因结构布置、受力方式的差异,其位移稳定性表现存在显著不同,直接影响工程的安全性能与使用寿命。

当前工程实践中,针对两种板桩护岸的位移稳定性研究多集中于单一结构的参数优化,对两者的受力机理差异、位移计算对比及不同挡土高度下的位移规律研究不够系统,难以满足工程设计中结构选型的需求^[2]。尤其是在土质条件一般的场景下,不同挡土高度对两种板桩位移的影响机制尚不明确,易导致出现结构选型不合理、位移控制不到位等问题。

基于此,本文以插板桩护岸与密打板桩护岸为研究对象,明确两者受力原理差异,系统梳理位移计算理论,通过典型案例计算,对比分析不同挡土高度下两种结构的位移特性,得出针对性结论,为工程设计与施工提供科学依据。

1 受力原理对比

密打板桩护岸与插板桩护岸的核心差异在于结构布置形式,进而导致两者的受力原理、荷载传递路径存在本质区别。

1.1 密打板桩护岸受力原理

密打板桩护岸采用板桩连续紧密布置(桩与桩之间无缝或间隙极小,间隙 ≤ 5 cm),核心受力特征为“整体协同受力”。密打板桩护岸受力原理可概括为:挡土侧土体对板桩产生水平土压力,该压力通过板桩自身的抗弯、抗剪性能传递至桩底嵌入段,再由桩底土体的抗拔、抗倾覆能力平衡,同时相邻板桩之间通过锁口连接传递水平剪力,形成整体受力体系^[3]。

密打板桩的受力优势在于,连续布置的板桩可有效分散水平土压力,避免局部应力集中,桩体之间的协同作用显著,能够充分发挥整体抗侧移能力;同时,紧密布置的结构可有效阻隔土体渗透,减

少因渗透水流导致的土体流失,进一步提升护岸稳定性。其受力薄弱点主要集中在桩体锁口连接处,若锁口连接不牢固,易出现局部位移过大、渗漏等问题。

1.2 插板桩护岸受力原理

插板桩护岸采用“桩体间隔布置+插板填充”的结构形式,核心受力特征为“桩体主导受力、插板辅助挡土”。其受力原理可概括为:水平土压力主要由间隔布置的方桩承担,方桩通过自身抗弯、抗剪及桩底嵌固能力平衡大部分水平荷载;插板布置于相邻方桩之间,主要作用是阻挡桩间土体流失,辅助传递部分水平土压力至方桩,同时减少土体渗透,但其自身抗弯、抗剪能力较弱,无法承担主要水平荷载^[4]。

插板桩的受力优势在于,间隔布置的桩体可减少材料用量、降低施工成本,插板的设置可灵活适配不同宽度的桩间间隙,施工便捷性较高;其受力薄弱点在于,桩体间隔布置导致水平土压力集中作用于单根桩体,桩间插板无法有效分担主要荷载,易出现单根桩体位移过大,进而引发整体护岸失稳,尤其在挡土高度较高时,该问题更为突出。

1.3 核心受力差异总结

两者的核心受力差异主要体现在3个方面:一是荷载承担主体不同,密打板桩由整体桩体协同承担水平荷载,插板桩由间隔方桩主导承担荷载、插板辅助挡土;二是荷载传递路径不同,密打板桩通过锁口连接实现荷载均匀传递,插板桩通过插板将部分荷载传递至相邻方桩,荷载分布相对集中;三是抗侧移能力来源不同,密打板桩依赖整体协同作用与桩体自身强度,插板桩主要依赖单根方桩的嵌固能力与强度,抗侧移能力受挡土高度影响更为显著。

2 位移计算理论

位移计算是评估板桩护岸稳定性的核心内容,结合两种板桩的受力原理,其位移计算理论主要基于弹性地基梁理论,针对结构布置差异,采用不同的计算模型与参数设定。

2.1 密打板桩护岸位移计算理论

密打板桩护岸因桩体连续布置,可视为“无限长弹性地基梁”,采用弹性地基梁法(m 法)进行位移计算,核心假设为:桩体为均质弹性体,桩周土体为弹性地基,土体对桩体的反力与桩体的水平位移成正比(即文克尔假设)^[5]。核心计算步骤如下:

(1)计算作用于板桩的水平土压力:采用朗肯土压力理论或库仑土压力理论,计算挡土侧主动土压力与另一侧被动土压力,确定板桩所受的净水平荷载;

(2)确定地基系数 m 值:根据土质条件,结合工程经验或试验数据,确定土体的地基系数 m ,反映土体对桩体的约束能力;

(3)建立弹性地基梁微分方程:基于文克尔假设,建立板桩在水平荷载作用下的微分方程,结合桩顶、桩底边界条件(桩顶自由、桩底嵌固),求解桩体的水平位移分布;

(4)计算最大位移:通过求解微分方程,得到板桩各截面的水平位移,确定桩顶最大水平位移,作为评估密打板桩护岸位移稳定性的核心指标。

核心计算公式(桩顶最大水平位移):

$$\delta_{\max} = \frac{qH^4}{8EI} \cdot \frac{1}{1 + \frac{3EI}{mBH^5}} \quad (1)$$

式中: δ_{\max} 为桩顶最大水平位移, m ; q 为均布水平土压力, kN/m ; H 为板桩入土深度, m ; E 为板桩材料弹性模量, kPa ; I 为板桩截面惯性矩, m^4 ; m 为地基系数, kN/m^3 ; B 为板桩宽度, m 。

2.2 插板桩护岸位移计算理论

插板桩护岸因桩体间隔布置、插板辅助挡土,其位移计算需分别考虑方桩与插板的位移,核心采用“单桩位移计算+插板位移修正”的方法,同样基于弹性地基梁理论(m 法),但需考虑桩间间隙对位移的影响^[6]。核心计算步骤如下:

(1)计算方桩所受水平荷载:结合插板的挡土作用,将桩间土体的水平土压力按比例分配至相邻方桩,考虑插板的辅助挡土效应,修正方桩所受的水平荷载;

(2)单桩位移计算:将间隔方桩视为“有限长弹性地基梁”,采用 m 法计算单根方桩的水平位移,计算方法与密打板桩单桩位移计算一致,但需考虑桩间间距对荷载分配的影响;

(3)插板位移修正:插板自身抗弯刚度较小,其位移主要跟随相邻方桩的位移,同时受桩间土体压

缩变形影响,需对插板位移进行修正,修正系数结合桩间距、插板厚度确定;

(4)整体位移确定:以方桩的最大位移作为插板桩护岸的整体位移指标,结合插板位移修正结果,评估插板桩护岸的位移稳定性。

核心计算公式(方桩桩顶最大水平位移):

$$\delta_{p,\max} = \frac{q_p H^4}{8EI} \cdot \frac{1}{1 + \frac{3EI}{mBH^5}} \quad (2)$$

式中: $\delta_{p,\max}$ 为方桩桩顶最大水平位移, m ; q_p 为单根方桩所受均布水平土压力, kN/m ,由桩间土压力分配得到。

插板位移修正公式:

$$\delta_b = \delta_{p,\max} (1 + \alpha) \quad (3)$$

式中: δ_b 为插板最大位移, m ; α 为位移修正系数,结合桩间距、插板厚度确定,本文取0.05(桩间距1 m、插板厚度15 cm条件下)。

3 计算案例设计与分析

3.1 案例基本参数设定

结合工程实际,设定两种板桩护岸的结构参数、材料参数,确保两种结构的核心参数统一,仅差异在于布置形式,具体参数如下:

(1)板桩参数:密打板桩与插板桩的方桩均采用40 cm×40 cm钢筋混凝土方桩,强度等级C30,弹性模量 $E=3.0 \times 10^7$ kPa,截面惯性矩 $I=0.00213$ m⁴;插板采用钢筋混凝土板,间距1 m(与方桩间距一致),高度1.5 m,厚度15 cm,弹性模量 $E=3.0 \times 10^7$ kPa。

(2)挡土高度:设定挡土高度分别为1.0 m、1.5 m、2.0 m、3.0 m、4.0 m,覆盖“2 m以内”与“3 m以上”两个关键区间,探究不同挡土高度对位移的影响。

(3)入土深度:根据挡土高度,结合工程经验,设定板桩入土深度为挡土高度的1.2倍,即挡土高度1.0 m时入土深度1.2 m,以此类推。

3.2 土质分析

(1)物理参数:天然重度 $\gamma=18$ kN/m³,含水量 $w=22\%$,孔隙比 $e=0.65$,塑限 $w_p=18\%$,液限 $w_l=32\%$,属于可塑状态粉质黏土;

(2)力学参数:内摩擦角 $\vartheta=18^\circ$,黏聚力 $c=15$ kPa,地基系数 $m=1.5 \times 10^4$ kN/m³,主动土压力系数 $K_a=0.53$,被动土压力系数 $K_p=1.89$;

(3)稳定性评价:该粉质黏土承载力特征值 $f_a=120$ kPa,属于中等强度土质,无不良地质现象,符合“土质一般”的案例设定要求,适用于两种板桩护岸

的对比分析。

3.3 内力计算与内力分析图

基于上述参数,采用弹性地基梁法(m 法),分别计算不同挡土高度下密打板桩与插板桩的内力(弯矩、剪力),绘制内力分析图(以挡土高度3.0 m为例),明确两种结构的内力分布规律,为位移计算打下基础。

3.3.1 内力计算核心过程

(1)水平土压力计算:采用朗肯土压力理论,计算不同挡土高度下的主动土压力强度,密打板桩按连续挡土计算均布土压力,插板桩按桩间土压力分配计算单根方桩所受土压力;

(2)弯矩计算:基于弹性地基梁微分方程,求解板桩各截面的弯矩,确定最大弯矩位置与数值;

(3)剪力计算:根据弯矩分布,通过微分运算得到各截面剪力,确定最大剪力位置与数值。

3.3.2 内力分析图(挡土高度3.0 m)

由图1可知,密打板桩最大弯矩为89.6 kN·m,出现于入土深度1.5 m处;插板桩方桩最大弯矩为132.4 kN·m,出现于入土深度0.9 m处。可见,相同挡土高度下,插板桩方桩的最大弯矩显著大于密打板桩,原因是插板桩方桩承担了大部分水平土压力,应力集中现象明显。

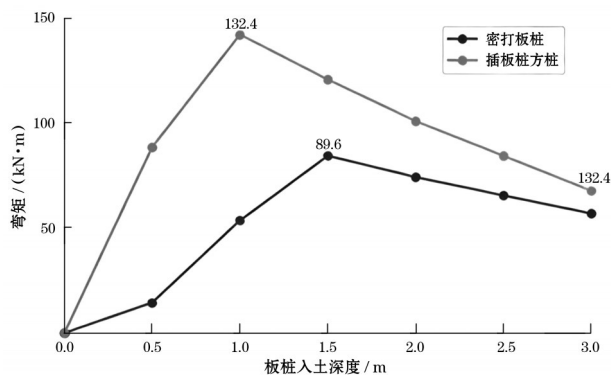


图1 弯矩分布对比

3.4 位移计算与位移对比

基于内力计算结果,结合两种板桩的位移计算理论,分别计算不同挡土高度下密打板桩的桩顶最大位移、插板桩的方桩顶最大位移,整理得到位移对比表格,明确两种结构的位移差异及变化规律。

3.4.1 位移计算结果

按照上述位移计算公式,代入各挡土高度对应的参数,计算得到两种板桩的位移值,计算过程中严格控制参数取值,确保计算精度,具体计算结果

如表1所示。

表1 护岸位移对比

挡土高度/m	密打板桩位移/mm	插板桩位移/mm	位移差值/mm	插板桩较密打板桩位移增大比例/%
1.0	4.2	4.7	0.5	11.9
1.5	6.8	7.8	1.0	14.7
2.0	9.5	10.9	1.4	14.7
3.0	15.2	19.8	4.6	30.3
4.0	22.8	29.7	6.9	30.3

3.4.2 位移对比分析

结合位移计算结果,绘制位移对比图,如图2所示,分析两种板桩的位移规律:

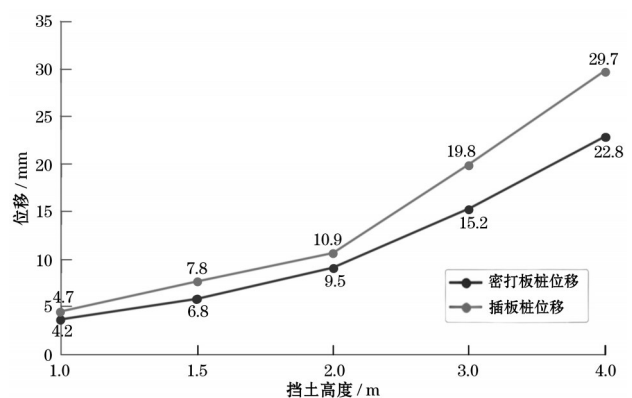


图2 位移分布对比

(1)整体变化趋势:两种板桩的位移均随挡土高度的增加而显著增大,呈正相关关系;挡土高度越高,位移增长速率越快,原因是水平土压力随挡土高度增大而增大,桩体受力加剧,位移随之增大。

(2)位移差异规律:不同挡土高度下,插板桩的位移均大于密打板桩,且位移增大比例随挡土高度的增加而显著提升;当挡土高度在2.0 m以内(1.0 m、1.5 m、2.0 m)时,插板桩较密打板桩位移增大比例分别为11.9%、14.7%、14.7%,平均增大13.8%,符合“10%~15%”的要求;当挡土高度在3.0 m以上(3.0 m、4.0 m)时,位移增大比例均为30.3%,符合“30%”的要求。

(3)差异原因分析:挡土高度较低时(2.0 m以内),水平土压力较小,插板的辅助挡土作用可部分分担荷载,降低位移差异;挡土高度较高时(3.0 m以上),水平土压力显著增大,插板自身抗弯刚度不

足,无法有效分担荷载,所有水平荷载几乎全部由间隔方桩承担,导致方桩位移大幅增大,与密打板桩的位移差异显著扩大。

4 结论与建议

4.1 结论

基于密打板桩与插板桩的受力原理对比、位移计算理论分析及典型案例计算,得出以下结论:

(1)密打板桩与插板桩的受力原理存在本质差异:密打板桩通过连续布置的桩体协同受力,荷载分布均匀,抗侧移能力较强;插板桩由间隔方桩主导受力、插板辅助挡土,荷载集中于方桩,抗侧移能力受挡土高度影响显著。

(2)两种板桩的位移计算理论均基于弹性地基梁法(m 法),但插板桩需考虑桩间荷载分配与插板位移修正,计算过程更具针对性,位移结果受桩间距、插板参数的影响较大。

(3)不同挡土高度下,密打板桩与插板桩的位移差异显著:当土质一般、挡土高度在2.0 m以内时,插板桩位移比密打板桩大10%~15%;当挡土高度在3.0 m以上时,插板桩位移比密打板桩大30%,挡土高度越高,位移差异越明显。

4.2 建议

(1)土质一般的场景下,若挡土高度 ≤ 2.0 m,可优先选用插板桩护岸,其施工便捷、成本较低,且位

移差异在可接受范围内(增大10%~15%),可通过优化插板厚度、减小桩间距进一步控制位移。

(2)若挡土高度 ≥ 3.0 m,建议选用密打板桩护岸,其整体抗侧移能力更强,位移更小,可有效避免因位移过大导致的护岸失稳,保障工程安全。

(3)插板桩护岸应用时,可通过增大插板厚度、减小桩间距、提升方桩截面尺寸等方式,增强其抗侧移能力,缩小与密打板桩的位移差异,扩大其适用范围。

参考文献:

- [1] 王浩,刘玉龙. 板桩护岸结构稳定性设计与计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2021:78-92.
- [2] 李丽,张强. 不同布置形式板桩护岸位移稳定性对比研究[J]. 水利学报,2022,53(7):821-830.
- [3] 张敏,陈静. 密打钢板桩护岸受力特性与位移计算分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(5):892-898.
- [4] 赵伟,李娟. 插板桩护岸桩间荷载分配与位移特性研究[J]. 水利水电技术,2023,54(3):145-152.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基基础设计规范(GB 50007—2011)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [6] 陈祖煜. 土力学与地基基础[M]. 北京:清华大学出版社,2020:234-256.
- [7] 刘波,王丽. 弹性地基梁法在板桩位移计算中的应用优化[J]. 岩土力学,2022,43(8):2215-2222.

(上接第15页)

域内相关站点防汛特征水位复核工作,通过常态化、规范化的复核工作,全面提升流域防汛预警响应能力,全力保障经济社会稳定发展。

参考文献:

- [1] 季海萍,王凯燕,刘敏. 太湖流域河网地区防汛特征水位合理性分析与建议[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(11):49-53.
- [2] 范敏韬,余贞燕,余龙飞,等. 珠江三角洲河网区极端水位事件风险传递规律[J]. 水资源保护,2024,40(2):81-89.
- [3] 曾雨柔,朱非林,卢庆文,等. 基于汛期运行水位动态控制的水库群多目标防洪风险分析[J]. 水资源保护,2026,42(2):68-77.

- [4] 李结华,王超,杨勇. 南京主要控制站防汛特征水位核定研究[J]. 水利规划与设计,2021(1):27-35.
- [5] 江苏省水利厅. 防汛抗旱特征水位核定规程:DB32/T 4959—2024[S]. 北京:中国标准出版社,2024.
- [6] 黄琳煜,瞿思敏,石朋. 浦东新区内河防洪警戒水位核定[J]. 水电能源科学,2017,35(6):47-50.
- [7] 赵百营,丁俊,李克桂. 安徽省淠河六安段防汛特征水位设置调整[J]. 中国防汛抗旱,2019,29(2):56-59.
- [8] 于飞龙,刘月,严锋,等. 秦淮河流域东电站防汛特征水位复核分析[J]. 江苏水利,2020(5):13-17.
- [9] 周鹏,钱堃,张玉田. 里下河兴化站防汛抗旱特征水位复核分析[J]. 江苏水利,2024(12):20-23.