

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.04.002

预应力混凝土板桩-冠梁协同支护作用机理

黄建华^{1,2}, 李龙真¹

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;
2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要:以湖岸支护工程为例,基于有限元模拟研究了支护结构内力及变形、地表沉降、基坑隆起以及土压力分布情况,探讨了桩顶锚固形式和板桩嵌固深度,得到板桩-冠梁协同支护体系工作机理。研究表明:板桩-冠梁协同支护体系的桩土协同作用机制与有锚板桩相似,桩体变形呈现中部鼓出状,主动土压力呈 R 形分布;桩顶冠梁锚固以及桩底嵌固作用是影响板桩支护性能的重要因素,板桩最佳嵌固深度比为 0.69~0.79。研究成果可为相关板桩支护的设计和工程应用提供参考借鉴。

关键词: 预应力混凝土板桩;冠梁;协同支护;作用机理;嵌固深度

中图分类号: TU470

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)04-0314-08

Synergistic support mechanism of prestressed concrete sheet-pile with crown beam

HUANG Jianhua^{1,2}, LI Longzhen¹

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;
2. Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities in Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Taking the lake bank support project as an example, based on the finite element simulation, the internal force and deformation of the support structure, surface settlement, foundation pit uplift and soil pressure distribution were studied. The anchorage form of the pile top and the embedded depth of the sheet pile were discussed, and the working mechanism of the sheet pile crown beam support system was obtained. Results show that the pile-soil interaction mechanism of sheet pile crown beam retaining system is similar to that of anchored sheet pile; the deformation of the pile is the bulging in the middle, and the active soil pressure is distributed in R shape; the anchorage of pile crown beam and the embedding effect of pile bottom are important factors affecting the support performance of sheet pile; the optimal embedding depth ratio of sheet pile is 0.69 ~ 0.79. The research results can provide reference for the design and engineering application of sheet pile support.

Keywords: prestressed concrete sheet-pile; top beam; synergistic supporting; action mechanism; embedded depth

板桩应用范围较广,随着板桩码头、板桩围堰、板桩护岸等支护类型的增多,板桩支护机理存在深入研究的必要性,以板桩码头为例,蔡正银^[1]等以深水板桩码头及其各类板桩结构形式为研究对象,基于土压力计算以及桩土内力、变形问题开展数值模拟及土工离心模型试验,为板桩码头新结构奠定了基础。对于预应力混凝土板桩这种新型支护结构,曾有一些学者针对其工作机理及工程应用展开研究,邵琪^[2]等研究了连续降

雨条件下预应力混凝土平板桩防渗墙的航道岸坡支护性能,研究表明,板桩位置和入土深度的合理布置可以有效延长渗径。刘汉中^[3]等首次将预应力混凝土 U 型板桩应用于滩涂促淤坝体结构,探讨了板桩在波浪荷载下的动力响应问题,研究表明,新型板桩结构具有良好的整体稳定性和力学性能。戴俊^[4]通过大沙河治理工程实例,分别对 U 形混凝土板桩护岸、灌注桩护岸、悬臂式挡墙护岸和生态砖护岸进行了分析对比,优选出技

术可靠、安全稳定、经济合理的 U 形板桩护岸结构。综上所述,目前国内外学者对预应力混凝土板桩在各类支护环境下的工程应用进行了一定研究,而对板桩在支撑、锚固条件下的协同作用机理研究较少。本文基于有锚板桩分析方法,针对湖岸支护环境下的预应力混凝土板桩-冠梁协同支护体系,应用有限元分析手段研究支护结构的桩土协同作用机制,进一步基于桩顶锚固形式、板桩嵌固深度探究支护机理。

1 板桩支护协同作用力学机理

作用在板桩上的荷载一般包括自重、侧向土压力、波浪力(围堰工程)、桩顶承受冠梁的竖向压力、锚杆拉力等,复杂的受力环境使得板桩承受双向受弯和受剪作用。板桩属于柔性支护结构,一般情况下板桩在桩顶锚固、水平支撑及土压力的协同作用下,支护结构的变形会引起土体应力扩散和内力重分布,跨中较大的主动土压力减小,桩顶及桩底的土压力增大,桩身中部出现土压力回缩区间,主动土压力呈“R”形分布。有研究表明,板桩的刚度、锚定点位置及基坑施工顺序等都会对主动土压力“R”形分布产生影响^[5]。在这种协同支护作用下,板桩主要有 3 种变形形式:

(1)拱出式变形:当板桩入土深度较浅且桩顶锚固作用较弱时,板桩整体向坑内移动,在桩顶锚固以及桩底土体嵌固作用下,桩身中部没有受到约束故向坑内拱出,此类变形一般出现在有锚板桩中;

(2)嵌固式变形:在拱出式变形的基础上,当板桩入土深度继续增大,桩身在坑底附近出现反弯点,桩底出现无变形区间,板桩中部拱出现象更加明显,此时板桩处于嵌固状态,支护性能较好;

(3)踢脚式变形:当土体较为软弱,桩顶锚固作用较大且入土深度较浅时^[6],板桩上部在锚固作用下位移较小,而入土段位移显著增大,桩底向坑内翘起。

2 板桩-冠梁协同作用分析模型

2.1 工程概况

拟建海峡青年交流营地人工湖湖岸板桩基坑支护工程,建筑场地位于福州市马尾区琅岐镇琅岐岛西侧,闽江大桥北侧,西靠闽江,地势平坦开阔,人工湖岸有海峡青年广场和海峡青年会展中

心等建筑。工程采用预应力混凝土板桩作为湖岸支护结构,以混凝土冠梁连接板桩及上部露天看台,形成“板桩-冠梁”一体式支护体系。

工程地质剖面图如图 1 所示,人工湖基坑安全等级为二级,边坡支护的设计使用年限为 50 a,板桩支护体系在基坑开挖期间作为支护结构共同受力,施工完成后作为永久性支护结构。桩顶以上土层采用放坡开挖与喷锚结合的方式进行边坡加固,湖内稳定水位约在冠梁以下 0.1 m 处,人工湖基坑深度约 4 m,设计桩长约 13 m,板桩总体处于淤泥层及泥质中砂层。

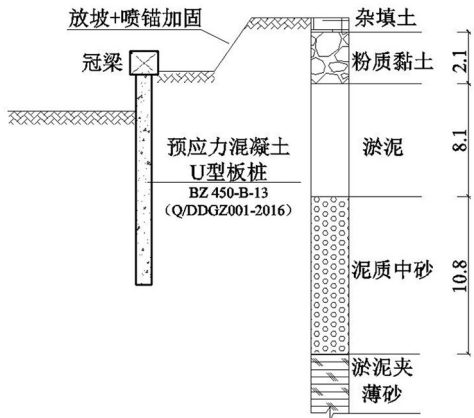


图 1 工程地质剖面图(单位:m)

Fig.1 Engineering geological profile(unit: m)

2.2 单元划分与属性定义

采用 Midas GTS NX 通用岩土有限元软件进行模拟分析,模拟范围为人工湖部分边坡及基坑区域,如图 2(a),整体模型沿边界至板桩方向采用线性梯度控制单元尺寸,以渐进加密的方式保证板桩墙以及板桩周围土体具有较高的网格密度,提高分析精确度,经过多次有限元试算,全局单元尺寸为 0.8 ~ 1.2 m 时,有限元计算结果与实测比较符合,同时计算效率较高。考虑扩大模拟范围验证边界效应的影响,确定整体模型尺寸为 50 m×20 m×30 m,板桩墙高 13 m,墙厚约 0.6 m,冠梁截面宽度 1 m,高度 0.6 m。

土体及支护结构主要物理力学指标见表 1,模型中土体及混凝土板桩采用三维实体单元,喷射混凝土采用板单元,锚杆及预应力钢绞线采用植入式桁架单元。土体采用摩尔库伦本构,预应力板桩、混凝土冠梁、喷射混凝土、预应力锚杆采用弹性本构模拟。由于实体单元无法读取内力值,故在板桩表面设置测量板单元。

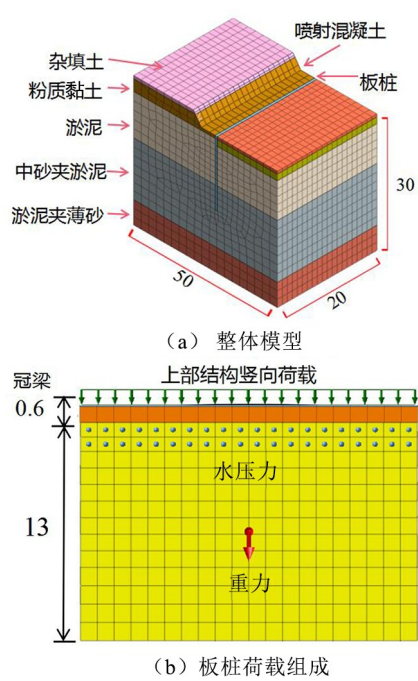


图 2 有限元模型示意图(单位:m)

Fig.2 Schematic diagram of finite element model
(unit: m)

表 1 土体及支护结构主要物理力学指标

Tab.1 Mechanical parameters of soil and
supporting structure

材料	泊松比	弹性模量/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
混凝土板桩	0.20	3.6×10^7	25.0	—	—
杂填土	0.20	4.0×10^4	17.5	5.0	8.0
粉质黏土	0.32	3.2×10^4	17.5	25.5	12.3
淤泥	0.33	8.0×10^3	15.7	7.3	1.7
中砂夹淤泥	0.30	2.8×10^4	17.0	5.0	16.0
淤泥夹薄砂	0.30	5.0×10^4	19.9	9.9	5.1

2.3 荷载及边界条件设置

板桩置于层状土中,桩顶承受冠梁及上部结构竖向荷载 15 kPa,桩身预应力钢绞线的有效预压应力为 9.33 MPa,临水一侧以水位边界自动施加水压力,如图 2(b)。整体模型以竖直向上为 Z 方向,在 - Z 方向施加重力,模型上表面为自由面,约束底部及 4 个侧面的法向位移。

2.4 桩土接触界面单元设置

冠梁与湖岸设置刚性连接约束,使冠梁自由度从属于湖岸。在桩前基坑开挖侧和桩后土体两侧生成三维界面单元,自动分离连接的节点,由于

初始场地未激活界面单元,为防止分析错误,在分离节点中建立刚性连接单元,在初始场地中排除板桩的影响。

2.5 施工阶段设置

数值模拟的求解类型选取“施工阶段”,即各施工工况考虑上一个工况的作用影响,为得到边坡安全稳定系数,各施工阶段进行边坡稳定 SRM (强度折减法)分析,共分为 4 个施工阶段:

- (1) 初始应力场:无支护结构,勾选位移清零,激活刚性连接单元;
- (2) 板桩施工阶段:激活界面单元、有效预压应力及上部荷载,钝化刚性连接单元;
- (3) 人工湖基坑开挖阶段:采用喷射混凝土进行基床加固;
- (4) 注水使用阶段:人工湖底部以及板桩未入土段的迎水面施加水压力。

3 板桩-冠梁协同支护作用机理

板桩施工及基坑竖向卸荷会引起土体扰动,根据地层补偿原理,桩后土体随基坑开挖向坑内移动,另一方面,随施工过程板桩前后的土压力呈现动态变化^[7],支护结构的水平位移随桩后土压力的增大而增大,故板桩与土体之间的变形和内力是紧密联系的,得到桩土协同变化规律是研究板桩支护机理的关键。

3.1 地表沉降及坑底隆起变化规律

如图 3 所示,工程基坑隆起可分为弹性隆起和塑性隆起两个阶段。

- (1) 弹性隆起:板桩施工引起坑内外土体扰动,由于侧向支护结构的限制,坑外土体向坑内移动较缓慢,坑底的弹性回弹是造成隆起的主要原因。由于中部承压水主要存在于泥质中砂层,板桩整体处于泥质中砂层和淤泥层中,此时开挖深度不大,坑底土体为不透水的粉质黏土,由于受到下方承压水向上的压力而产生隆起,坑底隆起量呈现两端小中间大的弹性隆起变化规律,靠近基底中心线的最大隆起量为 7.4 mm,基坑两侧隆起量约为 2 mm;

- (2) 塑性隆起:随基坑开挖的进行坑内外高差不断增加,支护结构的较大变形使坑内外土体压力差迅速增大,桩后土体在不平衡力的作用下向基坑内部移动,随着开挖深度增加,土体的松弛与蠕变加大了坑底隆起,坑底土层从透水性差的

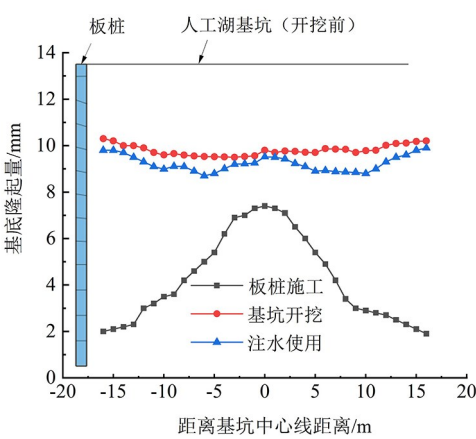


图 3 基坑隆起分布规律

Fig.3 Distribution law of foundation pit uplift

粉质黏土过渡到淤泥软弱土层中,土体伴随有效应力的增加发生膨胀,孔隙水进一步促进坑底土体软化,弹性隆起状态被破坏,转变为稳定的塑性隆起,整体隆起量稳定在 10 mm 左右。在人工湖注水使用阶段,竖向水压力作为有利荷载,一方面限制板桩的横向位移,另一方面平衡坑底向上的土压力,对坑底隆起起到一定程度的限制作用。

3 个施工阶段湖岸地表沉降如图 4 所示,随着基坑开挖的进行,地表由近至远位置处的沉降量先急剧增大,到达 3 倍基坑深度距离后逐渐减缓并趋于不变,具体呈现以下变化规律:

(1)板桩施工阶段:桩后相邻土地地表沉降量较小,约为 1.3 mm;最大沉降量为 20.5 mm,约为基坑开挖深度的 0.51%,出现在桩后 12 m 区域附近,此区域处于湖岸斜坡范围,受到地表超载作用,由于沉桩过程,造成土体原始应力状态受到破坏,且此处是杂填土和粉质黏土层向淤泥过渡的土层,故土体的扰动效应更加明显,沉降量迅速增加。地表沉降值在 12 m 以外的区域逐渐减少,并在相距 35 m 之后趋于稳定,地表沉降曲线整体呈现“V”形;

(2)基坑开挖阶段:由于人工湖土体的卸载,湖岸土体向板桩施加的主动土压力迅速增大,板桩呈现悬臂式支挡形式,坑后土体出现应变汇聚区域并形成剪切滑移面,随基坑开挖桩后土体逐渐形成向基坑内部的滑移通道,发展为地表沉降和坑底隆起。由于桩后远端的塑性变形区域远大于近端,故土体沉降由近到远逐渐递增,在坑后 12 m 处达到最大值,随后塑性影响范围减小,沉

降减缓并趋于零;

(3)人工湖注水使用阶段:由曲线可见,地表沉降基本保持不变,表明预应力混凝土板桩对水下支护环境较为适应,湖水一方面为板桩临水侧提供水压力,平衡桩后主动土压力,另一方面作为竖向荷载作用在基坑表面,减弱基坑的进一步隆起。

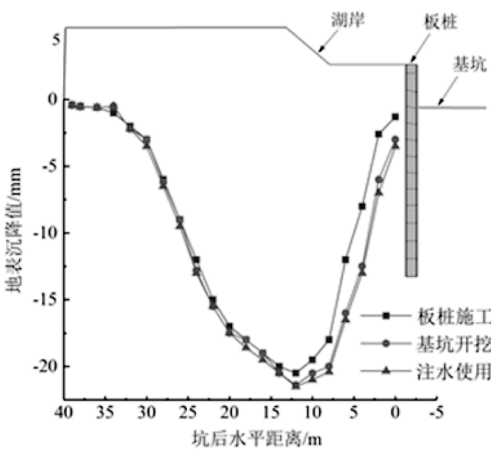


图 4 坑后地表沉降变化规律

Fig.4 Variation law of surface settlement behind pit

3.2 支护结构横向变形变化规律

各施工阶段下板桩最大横向位移及实测曲线如图 5 所示,冠梁顶部施加的刚性连接与实际的约束状态有偏差,各施工阶段模拟值均略小于实测值,但两条曲线的数值及变化趋势相近,可以认为数值模拟较为准确。

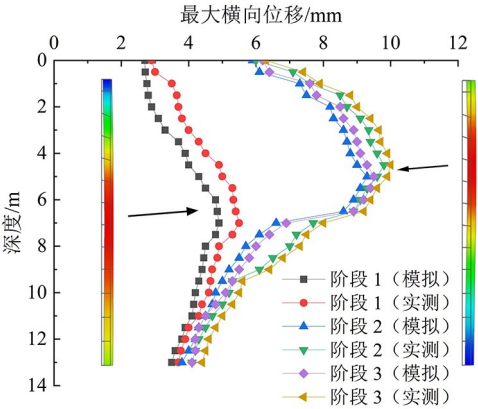


图 5 板桩横向位移变化规律

Fig.5 Variation law of lateral displacements of pile

阶段 1(板桩施工):此时基坑还未开挖,由于桩顶冠梁及桩底土体嵌固作用,最大位移区间出

现在板桩中部埋深 4~8 m 处,模拟及实测的最大水平位移分别为 4.9、5.5 mm,在深度范围内,板桩横向位移曲线呈现增大区间与减小区间平分的形式,且呈现桩顶、桩底位移较小,桩身中部位移较大的“鼓出”状;

阶段 2(基坑开挖):板桩受到桩后土压力作用呈现悬臂式受力形态,桩顶水平位移增大到 6.2 mm,最大位移区间竖向上移至 2~5 m 处,桩底最小位移 4.1 mm,板桩水平位移在基坑底部位置达到最大值 9.5 mm,较板桩施工阶段增加近一倍。此阶段板桩中部“鼓出”状更加明显,且位移减小部分桩长是增加部分的两倍,表明板桩在基坑开挖中虽然产生一定位移,但桩底三分之二范围内能够进入位移递减区间,并逐渐趋于嵌固,桩底范围内位移变化较小;

阶段 3(人工湖注水使用):整体位移曲线与基坑开挖阶段的变化趋势相近,静水压力作用相当于被动土压力施加在板桩临水面,使得桩身最大位移均减小,最大位移区间稍上移,表明板桩在水下支护环境中可以维持结构稳定。

3.3 土压力及支护结构内力变化规律

预应力混凝土板桩虽没有受到桩顶锚固作用,但冠梁将板桩与上部观景平台结构连接,整体结构在桩顶具有一定的锚固能力,起到限制水平位移的作用,桩侧主动土压力沿竖向呈现先增大后减小再二次增大的趋势,整体呈“R”形分布,与有锚板桩相似。

如图 6 所示,随着基坑开挖,板桩弯矩由 123 kN·m 增大到 129 kN·m,且最大弯矩区间由桩底上升至坑底位置,由于桩底尚有一定位移,桩身弯矩都不为零,故板桩还未处于完全嵌固状态。板桩最大剪力由 181 kN 增大到 202 kN,且剪力呈现桩顶和桩底较大、中部较小的趋势,这是由于人工湖基坑开挖深度相对较浅,土体对桩身中部的剪切作用不明显。从 3 个施工阶段来看,支护结构内力由板桩施工阶段到基坑开挖阶段增大明显,而过渡到注水使用阶段变化微弱,表明人工湖基坑开挖、土体卸荷对地层扰动作用较大,而湖水的作用对于基坑相当于土的回填,对于板桩相当于提供横向支撑,有利于整体结构的稳定。

3.4 桩顶冠梁锚固作用机理

板桩码头中的锚碇系统、土钉墙中的土层锚固技术以及预应力混凝土板桩-冠梁结构,都可

以起到约束桩顶变形的作用。由于本工程湖岸建筑群的存在难以实施锚碇结构,而土层锚杆技术^[8]以预应力锚杆对桩顶提供锚拉作用,在施工过程中锚杆的角度和位置可以根据实际情况进行灵活调整,故选取土层锚固式板桩与板桩-冠梁支护结构进行对比分析。

以原始模型为基准,除锚固形式外不改变任何参数,设置以下 3 个对照模型:

- (1) 不设置任何锚固形式,模拟悬臂式板桩;
- (2) 板桩-冠梁协同支护结构;
- (3) 土层锚固式板桩支护结构。

根据《岩土锚杆(索)技术规程》(CECS 22-2005)^[9],锚杆水平方向间距为 2 m,竖向间距为 1.5 m,共设置两层锚杆,锚杆与水平方向的倾斜角度 25°,锚杆自由段长 5 m,锚固段长 6 m,锚杆总长 11 m,使用两根直径为 15.2 mm 的预应力钢绞线,施加预拉应力 300 kN,采用锚建模助手以 1D 植入式桁架将锚杆自由段连接在桩顶位置,锚固段位于桩后粉质黏土层中。

板桩应力云图如图 7 所示,板桩-冠梁协同支护结构与土层锚固式板桩在桩顶位置都出现拉应力集中现象,其中冠梁与桩顶交接处的全长范围内拉应力较大,最大拉应力 1.13 MPa,受到土压力影响,压应力逐渐占据板桩平面,在坑底位置最大压应力约 0.72 MPa。土层锚固式板桩在桩身四分之一范围内以拉应力为主,最大拉应力分布在锚杆自由段锚头与桩顶的接触点周围,最大拉应力 2.0 MPa,压应力分布与板桩-冠梁协同支护结构相似,在坑底位置最大压应力约 0.54 MPa。预应力锚杆轴力分布呈现板桩两端向中央递增、自由端向锚固段递减、第一层锚杆轴力大于第二层的变化趋势,锚杆最大轴力 223.1 kN,出现在第一层中部锚杆的自由端锚头,最小轴力 49.2 kN,出现在第二层两侧锚杆的锚固段尾部。

3 种板桩模型的横向变形如图 8 所示(T_x 为板桩横向位移),无锚板桩呈现悬臂式受力变形,横向位移沿竖向递减,桩顶最大位移 17.7 mm,桩底发生较小位移 2.8 mm;土层锚固式板桩受到锚杆拉力和桩底嵌固的共同作用,桩顶水平向左位移 2.3 mm,结构最大位移区间位于板桩中部位置,最大位移约为 13.2 mm,较无锚板桩减小了 26.3%;板桩-冠梁协同支护结构的变形介于前两种模型之间,由于冠梁可以提供一定的嵌固作用

且增强板桩墙的整体性,同时没有锚杆的锚拉作用,故桩顶不会向后翘起,也不会发生悬臂式板桩的较大变形,最大位移区间与土层锚固式板桩相

近,最大位移量为 9.3 mm,较无锚板桩减小了 47.5%,较土层锚固式板桩减小了 29.5%。

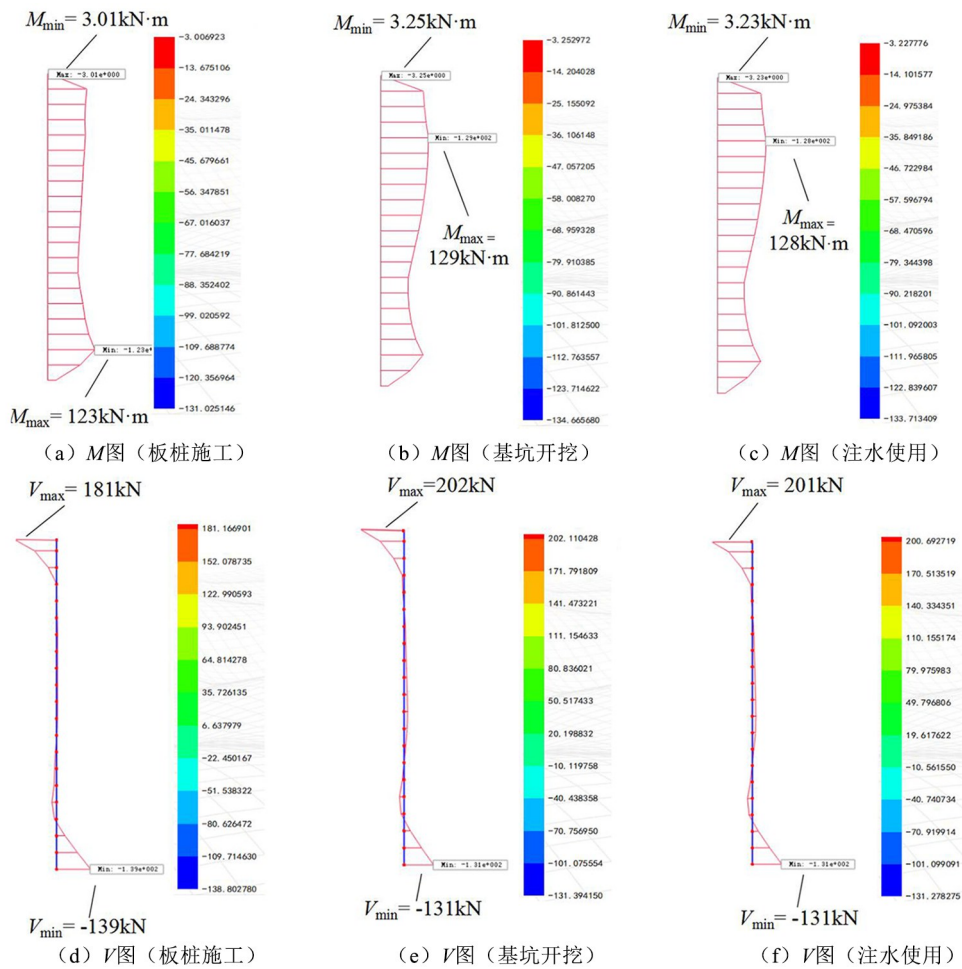


图 6 板桩内力分布规律

Fig.6 Internal force distribution law of sheet-pile

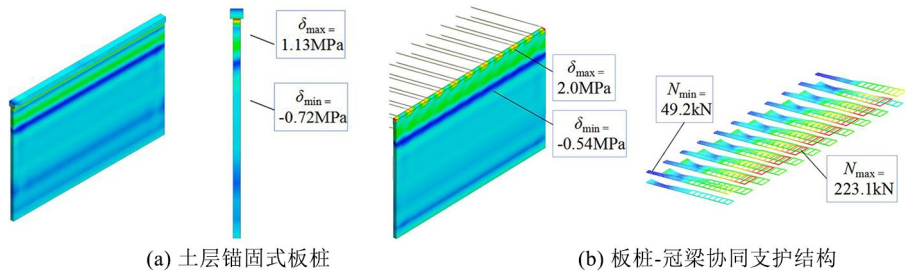


图 7 板桩应力云图

Fig.7 Stress nephogram of sheet-pile

由以上分析可知,锚杆和冠梁对板桩的横向位移都起到了一定的约束作用,板桩-冠梁协同支护结构的整体位移小于土层锚固式板桩和无锚板桩,在约束基坑变形上起到更好的作用。

3.5 桩底嵌固作用变化规律

上述 3 种模型在桩底都出现了较小的水平位移,即板桩还未达到稳定状态。实际上通过改变板桩的锚固形式实现桩底嵌固较为困难,支护结

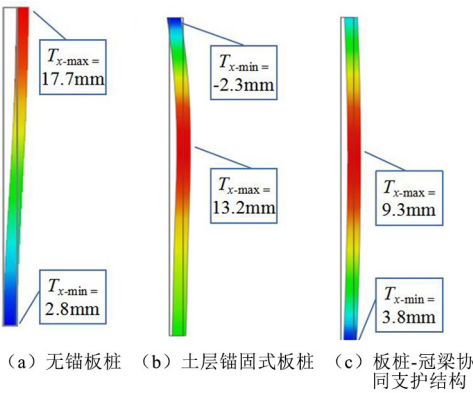


图 8 板桩横向变形云图

Fig.8 Nephogram of transverse deformation of sheet pile

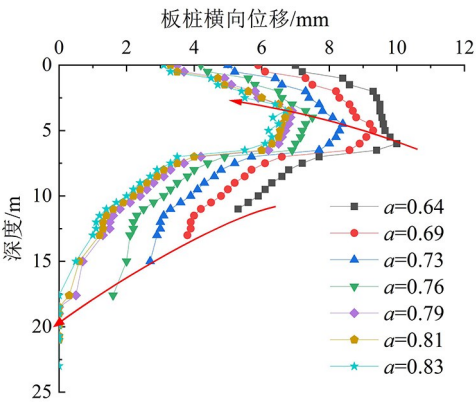


图 9 板桩横向位移变化规律

Fig.9 Variation law of lateral displacement of sheet-pile

构嵌固作用的主要影响因素是基坑开挖深度以及板桩嵌固深度,实际工程中基坑的开挖深度是一定的,嵌固深度对于支护结构安全稳定性和工程造价影响较大。

为研究板桩嵌固作用的发展过程,进行以下对照分析:基坑开挖深度 $h = 4\text{ m}$ 已确定,设置桩长 l 为变量,在原始场地及其他因素不变的情况下,研究板桩嵌固深度对支护效果的影响,选取嵌固深度 l_d 为 7、9 (原始深度)、11、13、15、17、19 m 共 7 组对照模型,其嵌固深度比 $a(l_d/l)$ 分别为 0.64、0.69、0.73、0.76、0.79、0.81、0.83,通过对比各组方案的横向位移曲线(图 9)得出:

(1) a 为 0.64、0.69、0.73 和 0.76 的 4 条曲线的水平位移变化趋势基本相同,最大位移值从 10 减小至 7.5 mm。板桩最大、最小位移点连线如图 9 中箭头所示,随嵌固深度增大,最大位移点逐渐上移,最小位移点逐渐下移,深度 6 m 时横向位移明显减小,嵌固深度比为 0.76 时,桩底有少量位移 1.6 mm;

(2) a 为 0.79、0.81、0.83 三段曲线近乎重合,当 a 达到 0.79 ($l = 19\text{ m}$) 时,板桩在 18.5 m 深度处已经没有位移,表明进入嵌固状态,其嵌固桩长 0.5 m;当桩长继续增加至 21、23 m,桩整体水平位移几乎不变,这两种情况下,板桩在 19、17.6 m 处提前进入嵌固状态,其嵌固桩长增加至 2、5.4 m。以上分析表明,板桩的嵌固深度从 0.79 时开始增加,并且增长幅度较大,板桩的嵌固区间占比逐渐增加,预计若继续增加桩长,桩体水平位移应无明显变化,嵌固深度会进一步增加,由于 $a = 0.79$ 时板桩已经处于嵌固状态,故继续增加桩长对工程安全及经济效益已无意义。

结合 a 为 0.64、0.79、0.83 工况下的板桩弯矩图(图 10),可得到板桩嵌固过程的 3 个阶段。

(1) $a = 0.64$ 基坑开挖前,支护结构在基坑内外两侧均受静止土压力作用,伴随坑内土体卸载,支护结构向基坑内侧发生变形,当基坑深度较浅且入土深度较小时,板桩受力以墙后主动土压力为主,墙前被动土压力沿竖向增大,在桩底平面达到最大值,此时板桩只有一个方向的弯矩,未出现反弯点,即未完全嵌固,桩底既有转角也有位移,桩身中部范围内弯矩明显减小,表明伴随后续被动土压力的增加,此区间出现反向弯矩的趋势;

(2) $a = 0.79$ 当板桩入土深度逐渐增加,桩前被动土压力将呈现先增后减的抛物线形态,桩底平面的被动土压力逐渐趋于零并向墙后发展,当墙前土压力进入被动土压力极限状态,板桩入土部分出现反向弯矩,桩身某一位置出现第一个反弯点,此时板桩嵌固于地基中;

(3) $a = 0.83$ 当桩长继续增加,第二个反弯点相继出现,板桩底部有向后翘的趋势,墙后被动土压力逐渐增大,桩底的固端弯矩将逐渐大于跨中弯矩,桩身稳定性出现富余。此后板桩嵌固深度继续加大,土压力维持在被动土压力极限状态而不再变化,这对减小跨中弯矩、增加结构稳定性已没有意义。

由于原始入土深度比为 0.69,考虑安全性和经济性指标,得到本工程板桩最佳入土深度比的区间为 0.69~0.79,当 $a = 0.69$ 时,板桩虽没有处于嵌固状态,但支护结构各项内力、变形指标都满足要求,若进一步考虑永久性支护结构的安全稳定性能,可以适当增加入土深度使板桩进入嵌固

状态。另一方面,经 SRM 法分析得到,人工湖边坡稳定性安全系数 F_s 随板桩嵌固深度的增大而

增大,当达到一定的嵌固深度时, F_s 也趋于不变^[10],故将 a 控制在 0.79 以内最为经济。

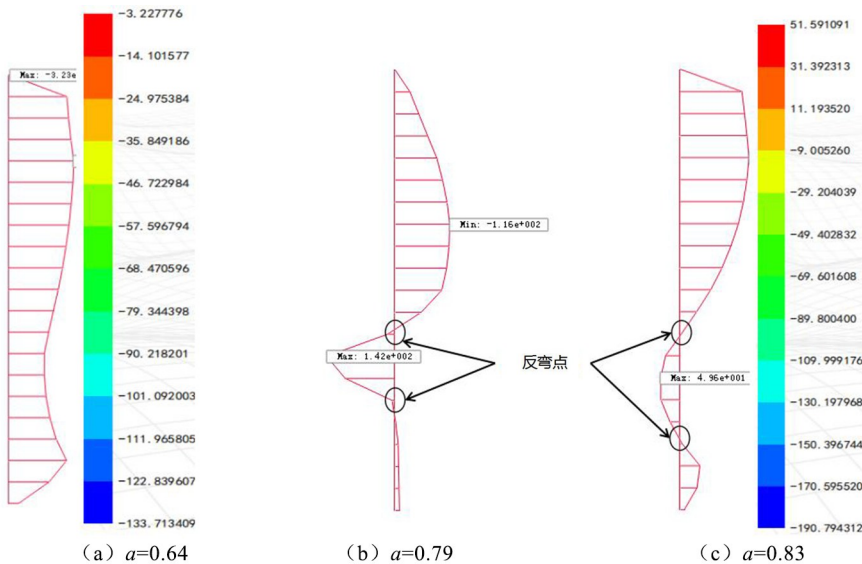


图 10 板桩弯矩变化规律

Fig.10 Bending moment variation law of sheet-pile

4 结论

- 1) 基坑隆起由弹性隆起转化为塑性隆起,桩后地表由近至远的沉降量先急剧增大,到达 3 倍基坑深度距离后逐渐减缓并趋于不变,地表沉降曲线整体呈现“V”型,符合剪切滑移面的土体滑动规律;
- 2) 支护结构内力由板桩施工阶段到基坑开挖阶段增大明显,过渡到注水使用阶段变化微弱,表明基坑开挖、土体卸荷对地层扰动作用较大,而

- 板桩-冠梁协同支护结构可以在水下环境保持结构稳定性并充分发挥边坡支挡作用;
- 3) 板桩-冠梁协同支护结构的变形介于无锚及有锚板桩之间,横向位移呈现中部“鼓出”状,且随基坑开挖更加明显,主动土压力呈现“R”形分布,与有锚板桩相似;
- 4) 冠梁和嵌固深度是板桩协同作用机制的重要影响因素,冠梁对桩顶起到锚固作用,板桩最佳嵌固深度比为 0.69~0.79,当 $a = 0.79$ 时,桩底出现无变形区间,此时工程经济性及安全性最佳。

参考文献:

[1] 蔡正银. 板桩结构土压力理论的创新进展[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 201-220.

[2] 邵琪, 李卫卫, 沈建霞, 等. 粉质航道岸坡降雨入渗条件下板桩墙防渗分析[J]. 水运工程, 2020(8): 133-140.

[3] 刘汉中, 张扬清, 王建华. 波浪荷载下 U 型混凝土板桩促淤坝动力响应数值分析[J]. 水利学报, 2015, 46(S1): 142-147.

[4] 戴俊. U 形预应力高强度混凝土板桩在大沙河综合整治工程中的应用[J]. 吉林水利, 2021(11): 23-26.

[5] 孙国栋, 董旭光, 田文通, 等. 框架锚杆支护多年冻土边坡的稳定性计算方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 124-131.

[6] 杨圣峰, 刘晓星, 冯燕平, 等. 深水致密砂岩地层中钢板桩围堰技术研究[J]. 公路, 2021, 66(1): 184-188.

[7] 孙博文. 超长拉森钢板桩在桥梁主墩承台深基坑支护中的应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

[8] 黄明华, 李嘉成, 赵明华, 等. 层状地基中锚杆拉拔荷载传递非线性分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 12-20, 56.

[9] 中冶集团建筑研究总院. 岩土锚杆(索)技术规程: CECS 22-2005 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.

[10] 朱一铭, 张奕. U 型板桩防护膨胀土边坡的性能研究[J]. 中国水运: 下半月, 2021, 21(4): 85-87.

(责任编辑: 陈雯)